

モーターボート競走公益資金による
日 本 財 団 補 助 事 業

平成7年度
超電導電磁推進装置の高出力化
に関する調査研究報告書

平成8年6月

財 団 法 人
シップ・アンド・オーシャン財団

は　じ　め　に

本報告書は、モーターボート競走公益資金による日本財団の平成7年度補助事業として実施した「超電導電磁推進装置の高出力化に関する調査研究」事業の成果をとりまとめたものである。

当財団では、昭和60年から超電導電磁推進船の開発を進めてきたが、平成4年に実験船「ヤマト 1」が世界で初めて実海域における航走実験に成功し、超電導電磁推進装置が船の推進装置として使用できることが実証された。しかしながら超電導電磁推進船を実用化するためには、「ヤマト 1」の超電導磁石を遥かに超える高磁界・大口径磁石の開発を始めとして、励磁システムや周辺装置の開発など、解決しなければならない技術課題が数多くある。

平成7年度は、高磁界用超電導コイルに使用されるNb₃Snの巻線技術を開発するために、コイル形状や巻線条件が変えられる「超電導コイル巻線機の製作」を行うと共に、高磁界超電導磁石を永久電流モードで使用する際に必要な大電流・高安定性「Nb₃Sn永久電流スイッチ」の開発を実施した。

本報告書は、それらの成果をとりまとめたものである。この報告書が高磁界・大口径超電導磁石の設計資料として有効に活用されれば幸いである。

本事業は、元良誠三 東京大学名誉教授を委員長とする「超電導電磁推進装置の高出力化に関する調査研究委員会」の各委員の熱心なご審議による他、運輸省のご指導をはじめ、多くの方々のご協力により完遂したものであり、これらの方々に対して心から感謝の意を表する次第である。

平成8年　6月

財団法人　シップ・アンド・オーシャン財団

会　長　　今　　市　　憲　　作

超電導電磁推進装置の高出力化に関する調査研究委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長 元 良 誠 三 東京大学 名誉教授

委 員 今 市 憲 作 (財)シップ・アンド・オーシャン財団 会 長

〃 京 谷 好 泰 (株)アテック 代表取締役

〃 正 田 英 介 東京大学 工学部 教 授

〃 中 島 洋 (財)鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道開発本部 技師長

〃 和 気 正 芳 高エネルギー物理学研究所 低温センター 助教授

目 次

はじめに

1. 事業の目的	1
2. 事業計画の内容	1
2.1 「ヤマト1」図書の刊行	1
2.2 超電導電磁推進装置の高出力化調査	1
2.3 海外における開発状況の調査	3
3. 委員会の開催	3
4. 超電導電磁推進装置の高出力化に関する調査	5
4.1 概 要	5
4.2 超電導コイル巻線機の製作	5
4.2.1 概 要	5
4.2.2 設計条件および仕様	6
4.2.3 超電導コイル巻線機の主要構造および制御方法	7
4.2.4 精度計測試験結果	15
4.2.5 まとめ	15
4.3 Nb ₃ Sn 永久電流スイッチの開発	21
4.3.1 概 要	21
4.3.2 Nb ₃ Sn 超電導線の採用による安定化	21
4.3.3 Nb ₃ Sn 永久電流スイッチの動作解析	24
4.3.4 Nb ₃ Sn 永久電流スイッチの製作	35
4.3.5 試験結果	36
4.3.6 総合評価	48
5. まとめ	49

Appendix 1 第14回国際磁石会議 (MT14) および第9回国際磁気測定会議
(IMMW9) 報告

Appendix 2 第14回電磁流体力学国際リガ会議 (MAHYD '95) 報告

1. 事業の目的

船舶への超電導技術の応用として、当財団では超電導電磁推進装置の開発を進めてきたが、平成4年6月に実験船「ヤマト 1」が世界初の海上航走に成功し、超電導電磁推進装置が船の推進装置として使用できることが実証された。

「ヤマト 1」の設計、建造および航走実験等の過程で得られた成果は、これまでにない貴重なものであり、その成果を広く一般に周知させることは超電導電磁推進船の研究を促進させるためにも必要である。そこで、「ヤマト 1」の総まとめとして図書を刊行し青少年の研究心の高揚を図る。

また、超電導電磁推進船の実用化のためには、超電導磁石の高磁界化を始めとして、大口径化、軽量化、励磁方法、冷凍技術などの更なる技術開発が必要である。平成6年度は高磁界用超電導コイルの概念設計を行い、超電導線材の圧縮歪による性能劣化などの技術課題の摘出を行ったが、これらの解決のためには何れも基本的なブレークスルーを必要とする。本年度はこれらの重要課題の内、化合物系超電導線の巻線技術を開発するための超電導コイル巻線機の製作、および大容量永久電流スイッチの開発を行い、超電導電磁推進船の実用化に資する。

2. 事業計画の内容

2.1 「ヤマト 1」図書の刊行

「ヤマト 1」の設計、建造およびその過程で得られた問題点や成果などについて総合的な取りまとめを行い、図書として刊行した。なお、図書の刊行に際しては別途編集会議を開いて実施した。

2.2 超電導電磁推進装置の高出力化調査

高磁界用超電導コイルに用いられる化合物系超電導線材の巻線による性能劣化の原因を調査するために、張力等を変えた系統的な巻線が可能な「超電導コイル巻線機」の製作を行った。また、大電流・高安定性を目指した「Nb₃Sn 永久電流スイッチ」の開発を行った。

一方、超電導技術に関する専門家を招いて講演会を開催し、最新の超電導技術に関する情報収集調査を行った。

1) 調査研究項目

a. 超電導コイル巻線機の製作

高磁界用超電導コイルの開発課題である「化合物系超電導線材の巻線による性能劣化の原因」を究明するために張力等の巻線条件を系統的に設定し、各種形式のコイルの製作が可能な超電導コイル巻線機を設計・製作した。

b. Nb₃Sn 永久電流スイッチの開発

高磁界超電導磁石を永久電流モードで使用する際に必要な10,000A級高安定性永久電流スイッチを開発するための第一段階として、Nb₃Sn線材を用いた1,000A級永久電流スイッチを開発し、通電試験および加振試験を行った。

2) 超電導技術専門家による講演

a. 「永久電流スイッチの開発動向」

講演日：平成7年6月6日（火）

講演者：萩原宏康氏

所属：湘南工科大学 電気工学科 教授

講演概要：PCS開発の歴史、種類、役割、開発の現状と今後の開発動向および開発課題等について

b. 「高磁場応用を目指した高温超電導材料プロセス研究の進展」

講演日：平成7年7月19日（水）

講演者：塩原融氏

所属：超電導工学研究所 第四研究部長

講演概要：酸化物系超電導体の種類、特性、開発の現状と高磁界への応用および開発課題等について

c. 「高磁場用超電導材料」

講演日：平成7年7月19日（水）

講演者：井上康氏

所属：金属材料研究所 強磁場ステーション 定常磁場ユニットリーダー

講演概要：Nb₃Sn・Nb₃Al等化合物系超電導体の現状、強磁界超電導磁石の現状、化合物系超電導体の特性・種類、製造の問題点、今後の開発計画等について

d. 「新しい永久磁石の開発」－現状と将来－

講演日：平成8年2月7日（水）

講演者：佐川真人氏

所属：インターメタリックス（株）代表取締役社長

講演概要：永久磁石開発の歴史、現状、希土類永久磁石開発の現状・特性、永久磁石の応用、永久磁石の経済性および今後の開発動向等について

2.3 海外における開発状況の調査

海外における超電導磁石や超電導電磁推進関連装置の開発状況等について、国際シンポジウムに参加し、情報収集および調査を行った。

・第一回調査

会議名：第14回国際磁石会議（MT14）および第9回国際磁気測定会議（IMMW9：MT14に付随した会議）

開催日：1995年6月11日～16日（MT14）、6月19日～20日（IMMW9）

場所：Finland Tampere, France Paris

参加者：和 気 正 芳 （高エネルギー物理学研究所）

会議内容：MT14 → エネルギー貯蔵、浮上式鉄道、強磁場発生、生体磁場、高温超電導、核融合、加速器、超電導基礎等
IMMW9 → ホール素子、共鳴法、サーチコイル、磁場共鳴等

・第二回調査

会議名：第14回電磁流体力学国際リガ会議（MAHYD '95）

開催日：1995年8月24日～26日

場所：Latvia Jurmala

参加者：元 良 誠 三 （東京大学名誉教授）

会議内容：MHD発電、MHD数値計算、MHD電気伝導度、液体金属等

3. 委員会の開催

開催日および主な審議事項（6回開催）

○第1回 平成7年6月6日（火）

- ・平成7年度事業の事業計画について
- ・特別講演

「永久電流スイッチの開発動向」

○第2回 平成7年7月19日（水）

- ・平成7年度事業経過報告
- ・特別講演

「高磁場応用を目指した高温超電導材料プロセス研究の進展」

「高磁場用超電導材料」

○第3回 平成7年9月7日（木）

- ・平成7年度事業経過報告
- ・平成8年度事業計画（案）

○第4回 平成7年12月15日(金)

・平成7年度事業経過報告

①Nb₃Sn永久電流スイッチの研究開発について

②Nb₃Snの巻線技術の研究開発について

○第5回 平成8年2月7日(水)

・平成7年度事業経過報告

①「Nb₃Sn永久電流スイッチの開発」進捗状況

②「超電導コイル巻線機の製作」進捗状況

・特別講演

「新しい永久磁石の開発」－現状と将来－

○第6回 平成8年3月18日(月)

・「超電導コイル巻線機の製作」進捗状況

・「Nb₃Sn永久電流スイッチの開発」の試験結果

・「超電導電磁推進装置の高出力化に関する調査研究」事業報告書(案)について

4. 超電導電磁推進装置の高出力化に関する調査

4.1 概 要

超電導電磁推進船「ヤマト 1」の実海域実証実験によって、超電導電磁推進装置が船舶の推進装置として使えることが実証された。しかし、その実用化には「ヤマト 1」の超電導磁石の磁界を遥かに凌ぐ強磁界の磁石を開発する必要がある。「ヤマト 1」の超電導磁石には、加工性の良い合金系のNbTiが用いられたが、NbTiの特性上磁界の強さは約8テスラが限度である。この磁界を越える超電導磁石を製作するためには、化合物系超電導線材のNb₃SnやNb₃Alを使用する必要がある。しかしながら、化合物系超電導線材は堅くて脆いため、コイルに巻く際の微少な割れなどによって性能が大幅に低下することが知られているが、性能劣化の原因を究明するためのコイルを用いた系統的な研究は行われていない。そこで、巻線条件を変えたコイルを製作し、性能試験を実施して巻線方法による性能劣化の原因を究明して、高磁界コイルの製作上の設計資料とする。本年度はその第一段階としてコイルの形状や巻線時の張力などが変えられる高性能巻線機を開発した。

また、超電導磁石を永久電流モードで使用するためには、永久電流スイッチ(PCS)が必要不可欠である。「ヤマト 1」ではNbTiを用いたPCSが使用されたが、臨界温度が低いため外部から侵入した熱によってクエンチする現象が見られた。10Tを越える高磁界磁石には、「ヤマト 1」で用いたPCS(4,000A級)を遥かに越える10,000A級の大電流PCSが必要となるが、この様な大電流PCSを開発した例はない。そこで、10,000A級のPCSを開発することとし、本年度はその第一段階として臨界電流の高いNb₃Snを用いた1,000A級の信頼性の高い小型・軽量の永久電流スイッチの開発を行うこととした。

4.2 超電導コイル巻線機の製作

4.2.1 概 要

現在、高磁界超電導コイルに用いられる線材は、主として化合物超電導体のNb₃Snが使われているが、その利用はあまり進んでいないのが現状である。その理由は化合物超電導体は化合物であるが故に割れやすく、複雑な形状と極端な電磁力にさらされる磁石では超電導体の持つ性能が十分生かされていないためである。複雑な形状のコイルを巻く際に生じる割れなどの性能劣化原因の究明を実験で系統的に行うには、張力やねじれ等を自由に制御でき、系統的に巻線条件を設定できる巻線機が必要となる。

本超電導コイル巻線機は、Nb₃Sn、Nb₃Al等の化合物超電導線材を使用したソレノイド、レーストラック、ダイポール等の超電導コイルを製作するため、コンピュータにより巻棒やスペーサに合わせた巻線姿勢制御を行うと共に、線材に一定の張力を加え、巻線時の曲げ、ねじり、衝撃など手作業で行う際に生じる不確定な線材への影響を除くため系統的な巻線を行い、性能劣化の原因を明かにする。

4.2.2 設計条件および仕様

設計条件および仕様を表4.2.1に示す。

表4.2.1 設計条件および仕様

(1) 設計条件

線材の形状	ラフ・フォード型線材（断面寸法 幅：約10mm 厚さ：約2mm）
コイルの種類と 大きさ	くら型 最大φ400mm×L1000mm
	レ・ストラック型 最大L1000mm×B400mm×H400mm
	ソノイト型 最大φ400mm×H400mm
巻線方式	シャトル方式
制御軸数	5軸：線材供給装置台車，昇降，揺動，旋回，巻枠移動台車
精 度	移動距離精度 ±0.5mm（最大ストローク時）
	張力精度 ±10% （最大張力付加時）

(2) 仕様

全 体	大きさ L:2980mm×B:3300mm×H:4480.5mm
線材供給装置	・線材供給装置台車制御 作動方向 横行 駆動装置 減速機付ACサーボ・モータ ストローク 1000mm
	・線材供給ハット制御 作動方向 昇降，揺動，旋回 駆動装置 減速機付ACサーボ・モータ 作動量 昇降：600mm，揺動：90°，旋回：360°
	・張力付加装置 張力範囲 0kgf～50kgf 駆動装置 減速機付ニア・モータ＋ニア・クラッチ 張力検出 ロート・セル 張力制御 PID制御
	・線材供給ドラム 大きさ 最大外径：φ600mm
巻枠移動台車	大きさ L:2980mm×B:682mm×H:950mm 駆動装置 減速機付ACサーボ・モータ ストローク 2000mm

4.2.3 超電導コイル巻線機の主要構造および制御方法

(1) 主要構造

超電導コイル巻線機は、巻線機架台、線材供給装置台車部、線材供給ヘッド部、コイル巻枠移動部で構成され、巻線機架台上部には(1)線材供給装置台車があり、走行レールを前後に移動する。線材供給装置台車は、線材供給ドラム、線材供給ヘッド部で構成されている。また、線材供給ヘッド部は、(2)昇降装置、(3)揺動装置、(4)旋回装置で構成されている。巻線機架台下部には(5)巻枠移動台車があり、走行レールを左右に移動する。前記の各移動要素(1)～(5)の5軸で巻線姿勢制御を行っている。また、線材供給ヘッド先端には張力付加装置が置かれ、巻線時の張力制御を行っている。

各移動要素の最大移動量は、(1)線材供給装置台車：1,000mm、(2)線材供給ヘッド昇降装置：600mm、(3)線材供給ヘッドの揺動装置：90°、(4)線材供給ヘッド旋回装置：360°、(5)巻枠移動台車：2,000mmで、それらはコンピュータで同時に移動することができる。また、張力付加装置は手動で0～50kgf間の任意の張力を線材に与えられる。

超電導コイル巻線機の全体構造図を図4.2.1に、超電導コイル巻線機全体写真を写真4.2.1および4.2.2に、線材供給ヘッド部及び巻枠移動台車を写真4.2.3に、張力付加装置を写真4.2.4に示す。

(2) 制御方法

巻線機の各移動要素の制御は、コンピュータの移動命令をネットワーク（インサネット）を介して数値制御コントローラへ入力し、5台のACサーボモータドライバでACサーボモータを駆動している。張力付加装置の付加機構は、1対のゴムベルトで線材を挟み、線材の移動と共に回転するゴムベルトの回転トルクを制御することにより行う。なおこの時、線材とゴムベルトの相対滑りが発生しないよう十分な押え力で挟んでいる。

張力の制御は、ゴムベルトの回転トルクを制御することにより行うが、それは定回転するエアーマータに接続しているエアークラッチの可変で行う。張力が設定張力±5kgf以内になるように、ロードセルで計測した張力値をシーケンサに入力して、フィードバック制御を行っている。

巻線機の各移動要素の作動系統を示す巻線作動系統図を図4.2.2に、コンピュータから構成機器の制御の流れを示す巻線制御系統図を図4.2.3に示す。

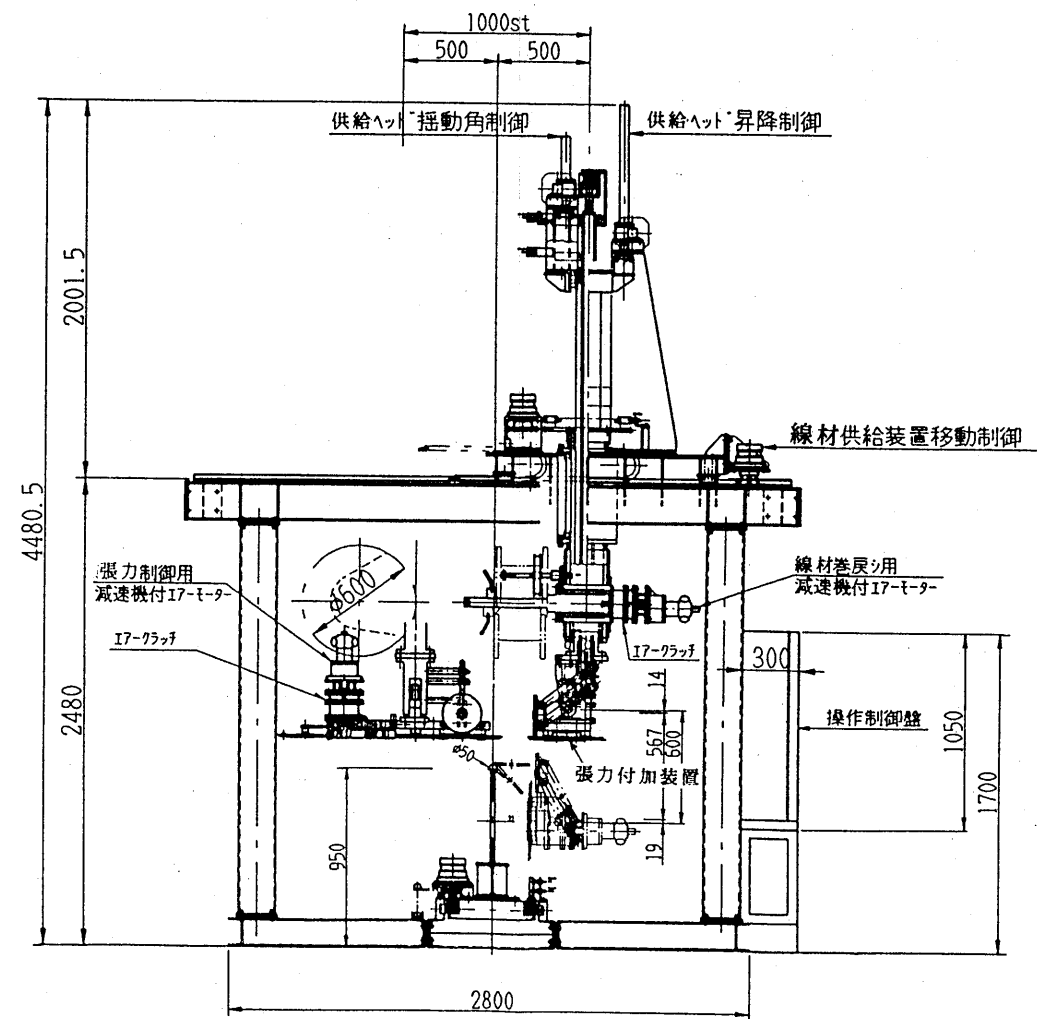
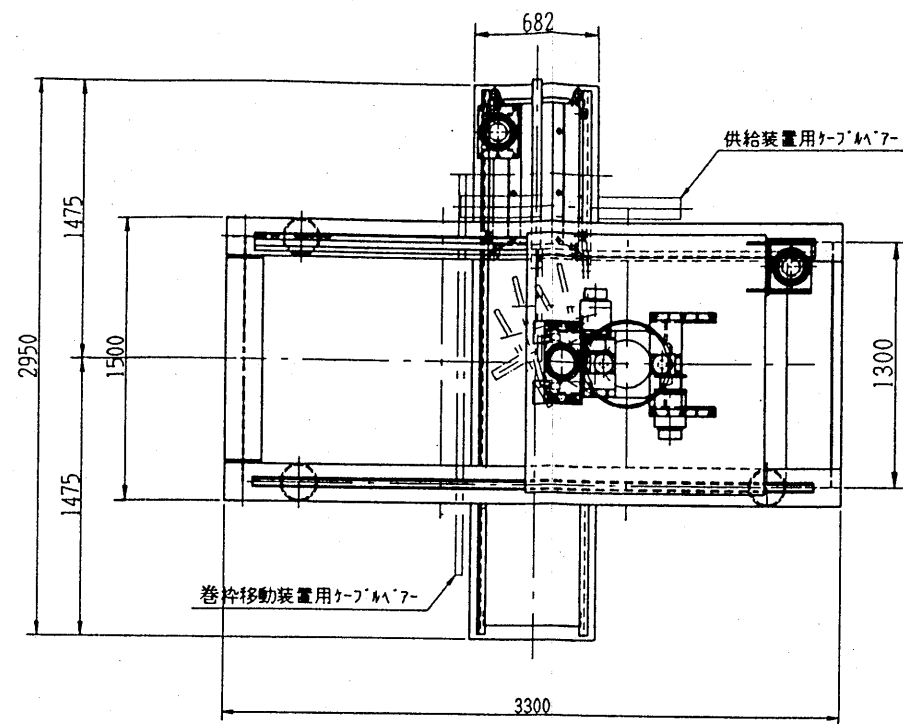
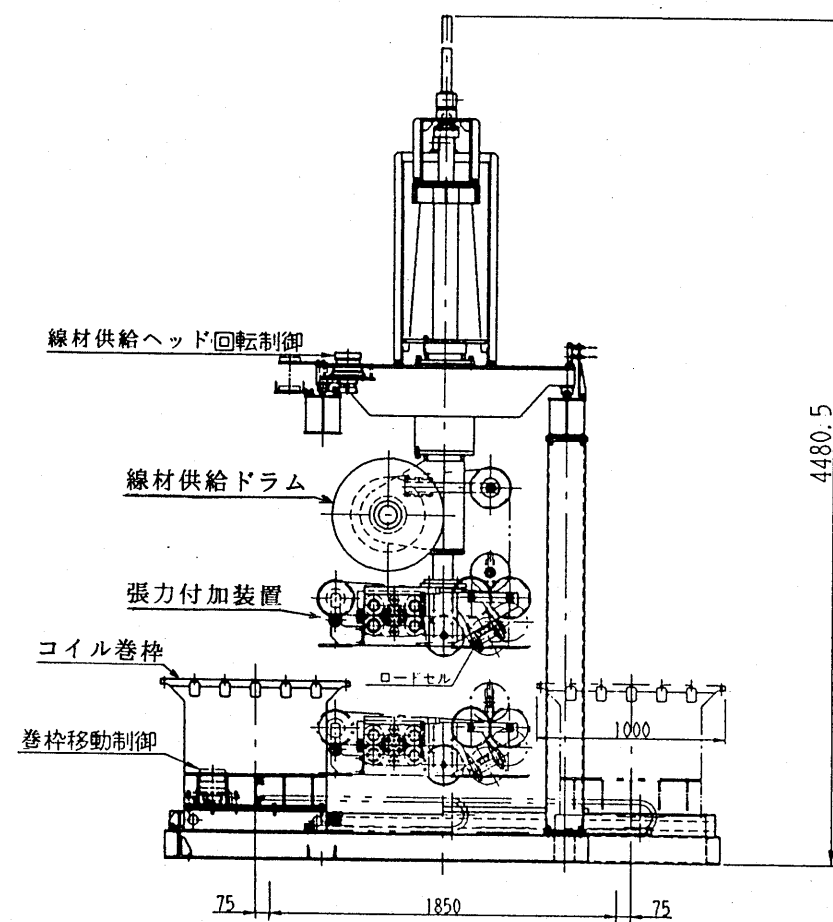


図4.2.1 超電導コイル巻線機全体構造図

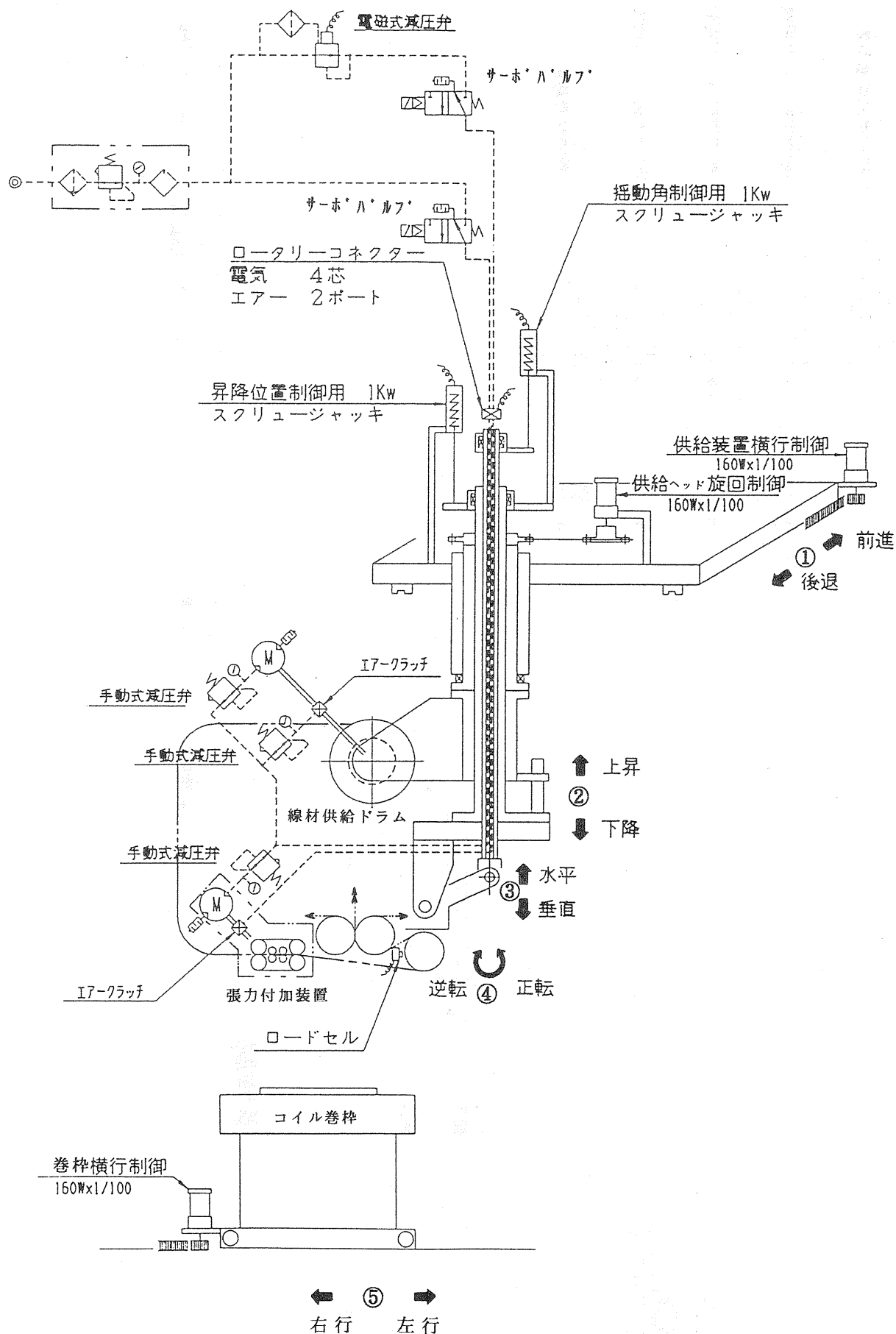


図4.2.2 巻線作動系統図

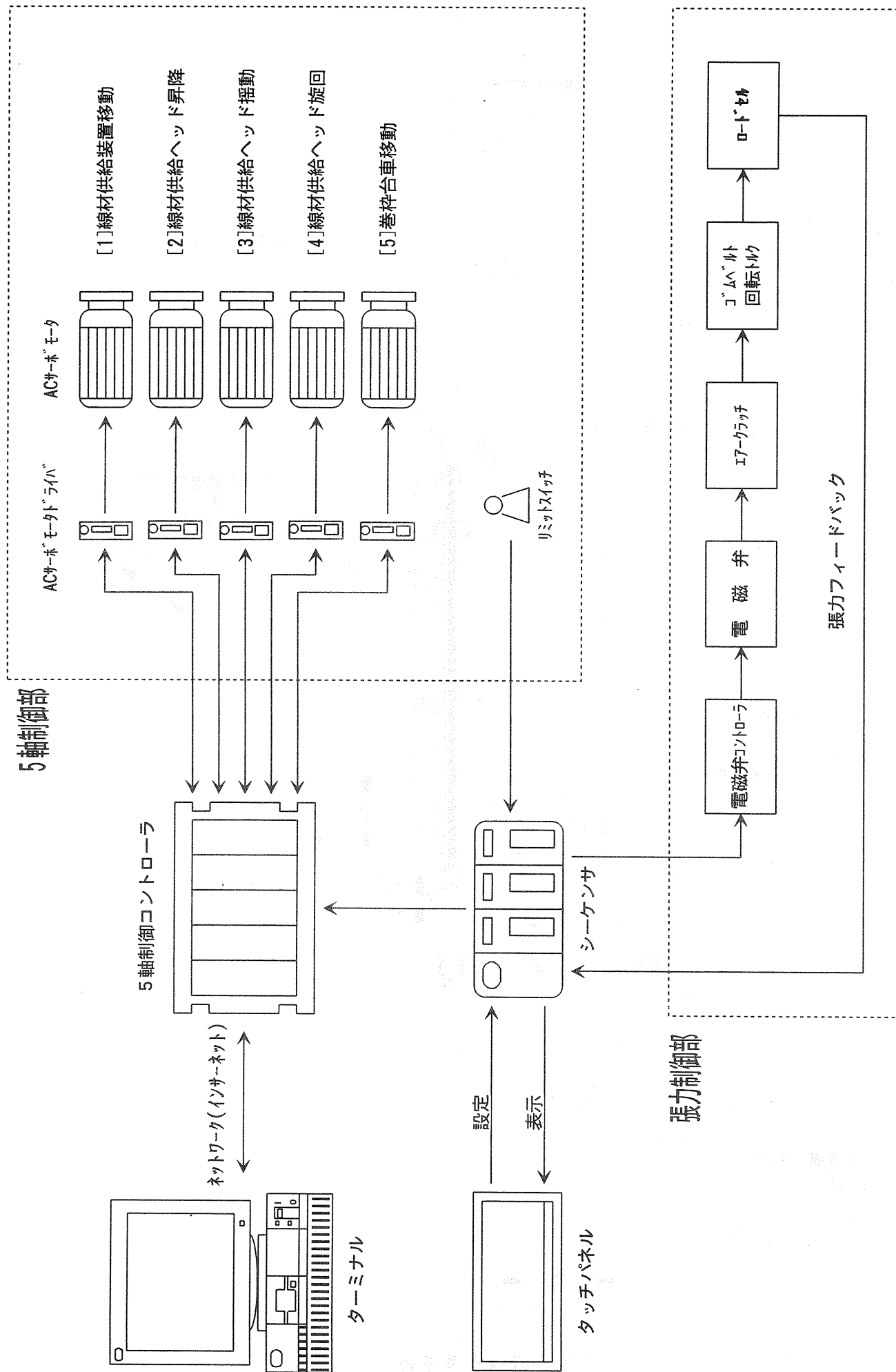


図4.2.3 巻線制御系統図

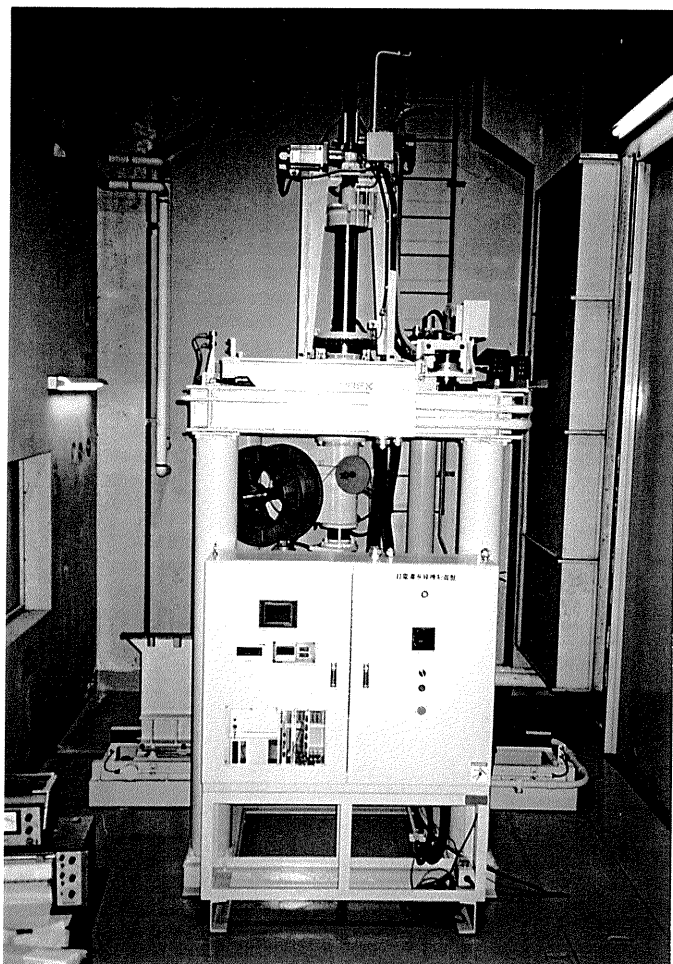


写真4.2.1 超電導コイル巻線機全体（正面）

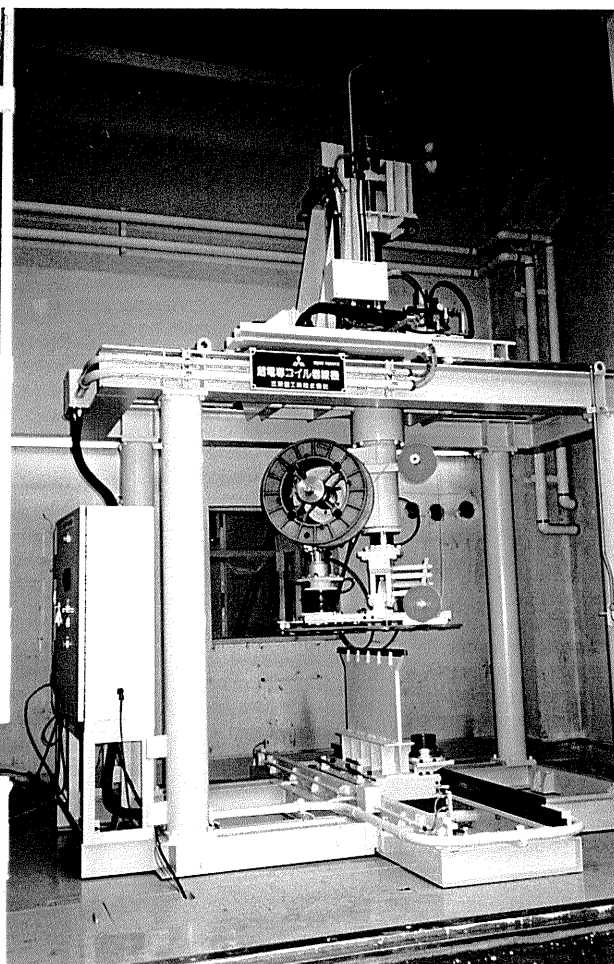


写真4.2.2 超電導コイル巻線機全体（側面）

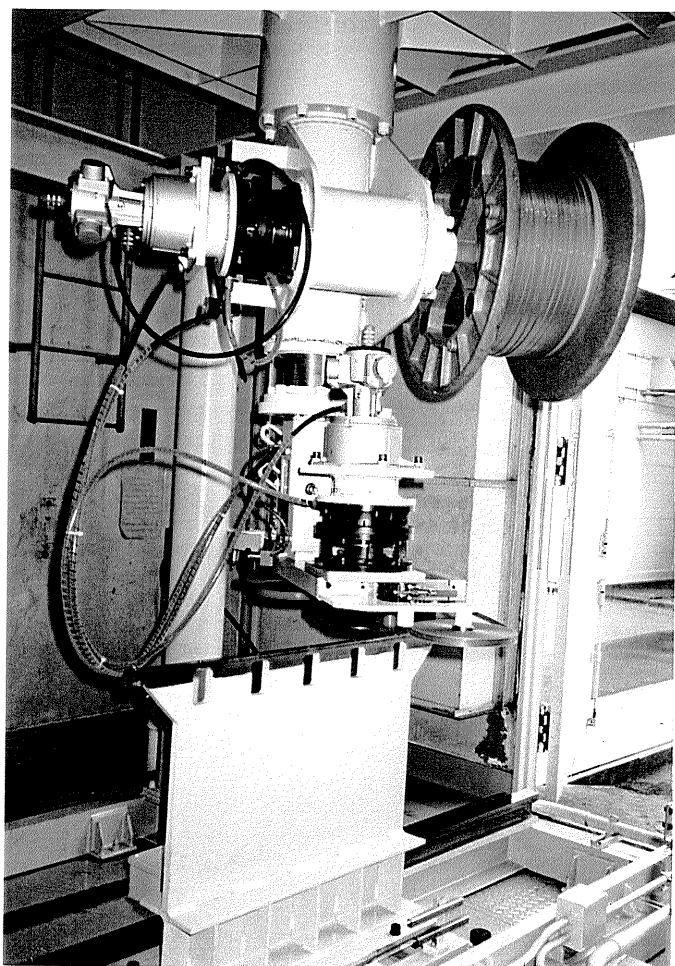


写真4.2.3 線材供給ヘッド部及び巻枠移動台車

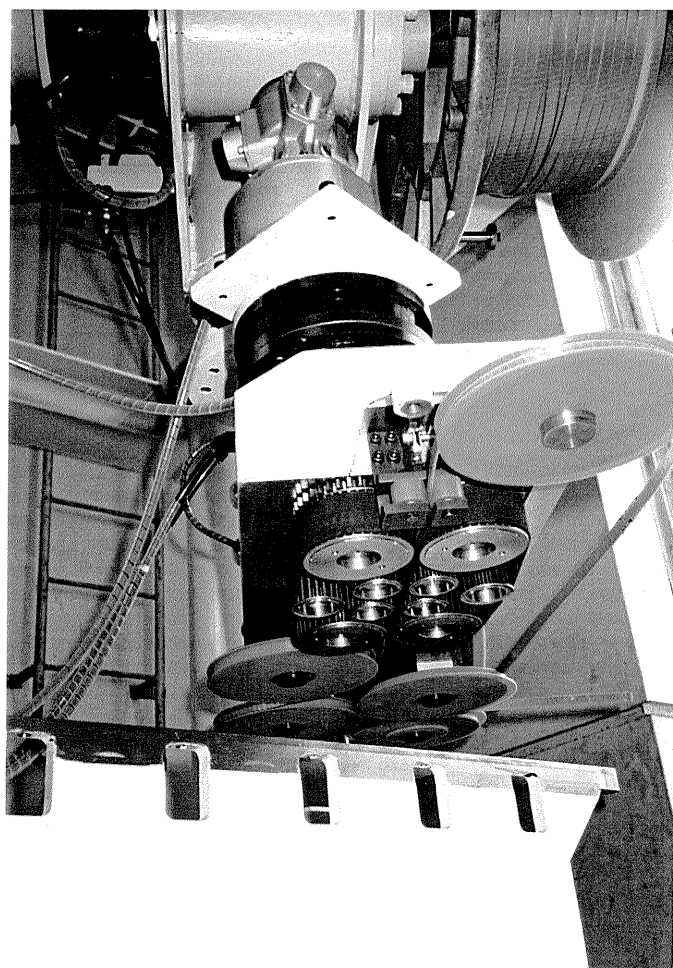


写真4.2.4 張力付加装置

4.2.4 精度計測試験結果

線材供給装置台車、巻枠移動台車、線材供給ヘッドの昇降・旋回・揺動部の各々の最大移動距離における位置精度および角度の精度と張力付加装置の張力付加精度を測定した。

張力は、台車等が静止している状態（静止時）と台車等が移動している状態（巻線時）の両状態で張力の変動値を測定した。

位置および角度の精度測定は、コンピュータで設定値（最大移動量）を与えて各移動要素を移動し、両端のリミッタスイッチの停止位置までの距離と設定値の差を測定した。移動距離はステンレススケールで、角度は停止位置にダイヤルゲージをセットして測定した。

位置および角度の精度測定結果を表4.2.2に示す。

張力付加装置の張力測定では、予め設定した張力をシーケンサへ入力し、静止時および巻線時のロードセルの出力をペンレコーダに記録した。

張力付加試験（静止時）結果および実験データの例を図4.2.4、図4.2.5に、張力付加試験（巻線時）結果および実験データの例を図4.2.6、図4.2.7に示す。

各移動要素の位置および角度の精度は、表4.2.2に示すように、移動距離では設定値に対して最大 $+0.12\text{ mm}$ ～ -0.05 mm の範囲であり、角度は揺動角で -0.07° 以下、旋回角では -0.01° であった。また、張力の変動値は、静止時では図4.2.4に示すように設定張力の約2%以内の変動であった。巻線時では図4.2.6に示すように最大張力（ 50 kgf ）の $\pm 10\%$ （ $\pm 5\text{ kg}$ ）以内であり、各移動要素および張力付加装置共設計仕様の精度を満足している。

4.2.5 まとめ

本超電導コイル巻線機の製作では、巻線時の張力が一定で、線材の曲げ・ねじり等の応力のばらつきを極力少なくし、系統的巻線を行うためのすべての要求を満足することを確認した。

本超電導コイル巻線機の完成で、種々の巻線条件を変えたコイルの製作が可能になり、Nb₃Sn等化合物超電導コイルの製作過程で線材に与える性能劣化原因の究明が促進されると共に、高磁界超電導コイルの製作技術の向上が期待できる。

表4.2.2 位置精度測定結果

(1) 線材供給装置台車 (最大移動量 : 1000mm)							
動作位置設定		前進・後退速度 (mm/sec)	停止位置精度 (mm)				
方 向	位 置		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
前 進	前進端	14	+0.07	+0.04	+0.06	+0.05	+0.07
後 進	後進端	14	+0.09	+0.05	+0.05	+0.05	+0.07

(2) 線材供給ハット, 昇降 (最大移動量 : 600mm)							
動作位置設定		上昇・下降速度 (mm/sec)	停止位置精度 (mm)				
方 向	位 置		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
上 昇	上昇端	5.2	+0.02	+0.02	+0.02	+0.02	+0.01
下 降	下降端	5.2	-0.01	-0.01	-0.01	-0.03	-0.05

(3) 線材供給ハット, 揺動角 (最大揺動角 : 90°)							
動作位置設定		揺動速度 (°/sec)	停止位置精度 (°)				
方 向	位 置		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
垂 直	垂直端	0.75	-0.01	-0.02	-0.03	-0.04	-0.03
水 平	水平端	0.75	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

(4) 線材供給ハット, 旋回角 (最大旋回角 : 360°)							
動作位置設定		旋回速度 (°/sec)	停止位置精度 (°)				
方 向	位 置		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
右	原 点	6	-0.01	-0.01	—	—	—
左	原 点	6	-0.01	-0.01	—	—	—

(5) 巻枠移動台車 (最大移動量 : 2000mm)							
動作位置設定		左・右速度 (mm/sec)	位置読取り誤差 (mm)				
方 向	位 置		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
右	右 端	22	+0.09	+0.07	+0.10	+0.11	+0.12
左	左 端	22	+0.02	+0.04	-0.03	+0.08	-0.02

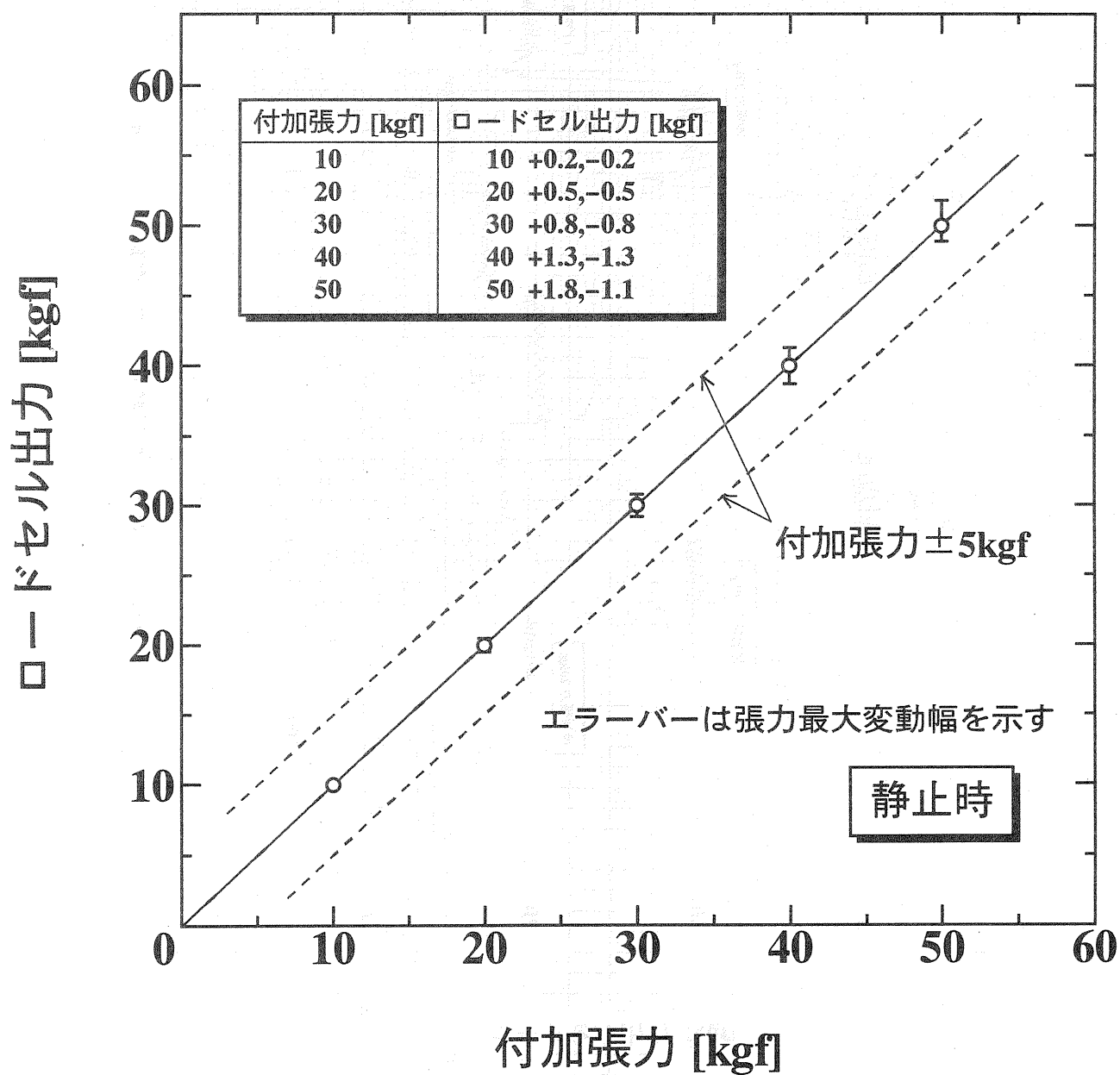


図4.2.4 張力付加試験結果(静止時)

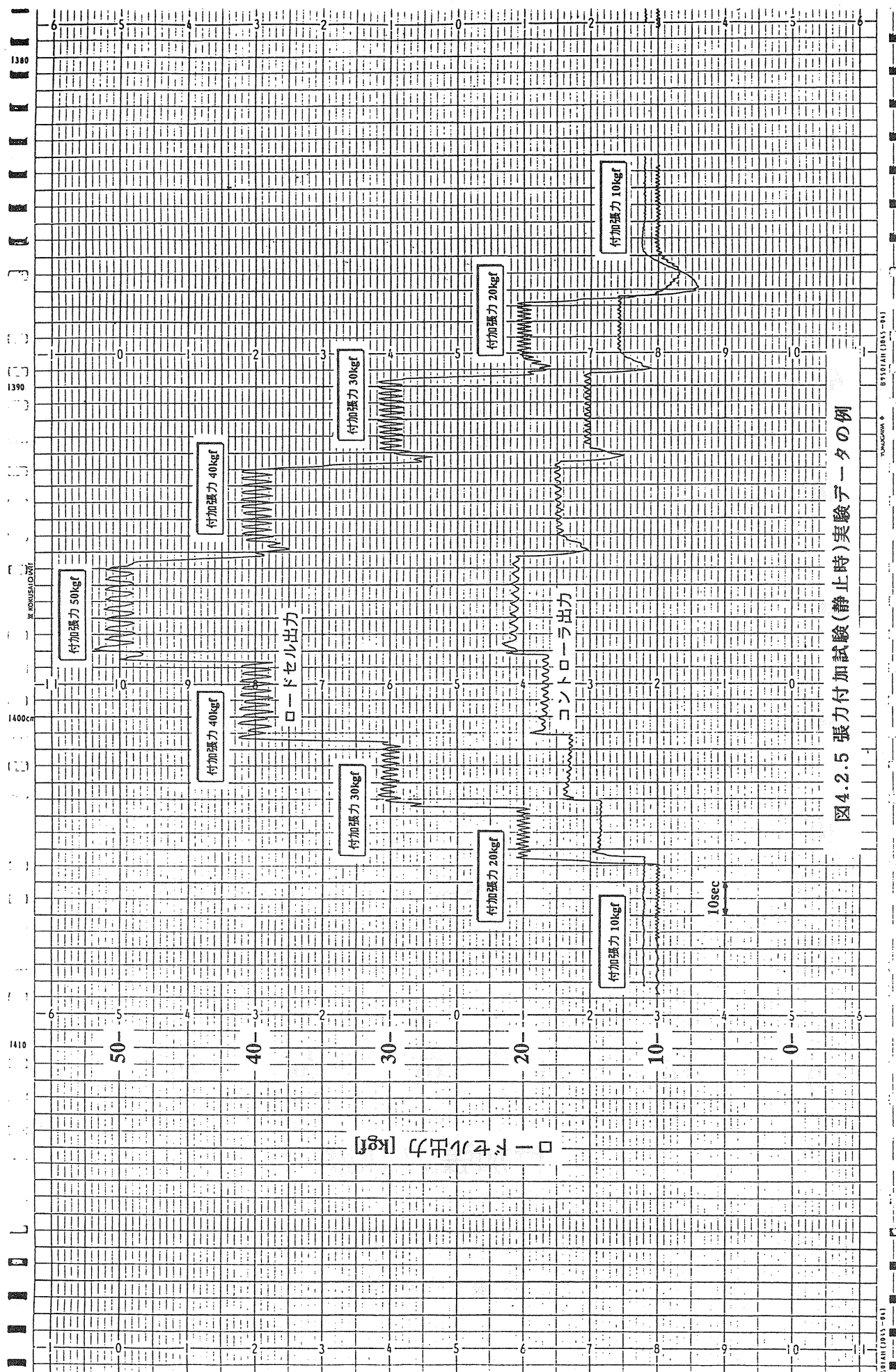


図4.2.5 張力付加試験(静止時)実験データの例

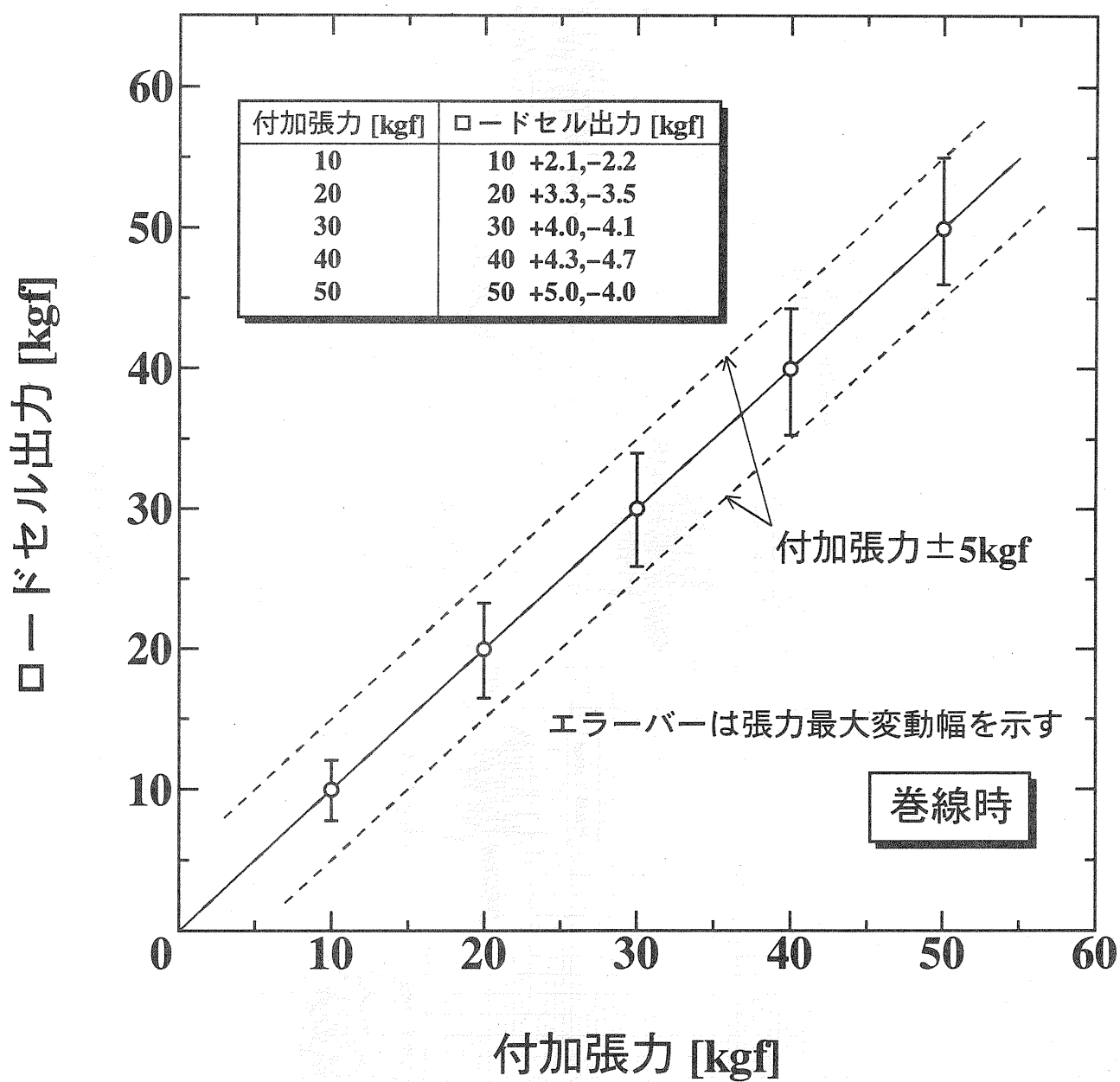


図4.2.6 張力付加試験結果(巻線時)

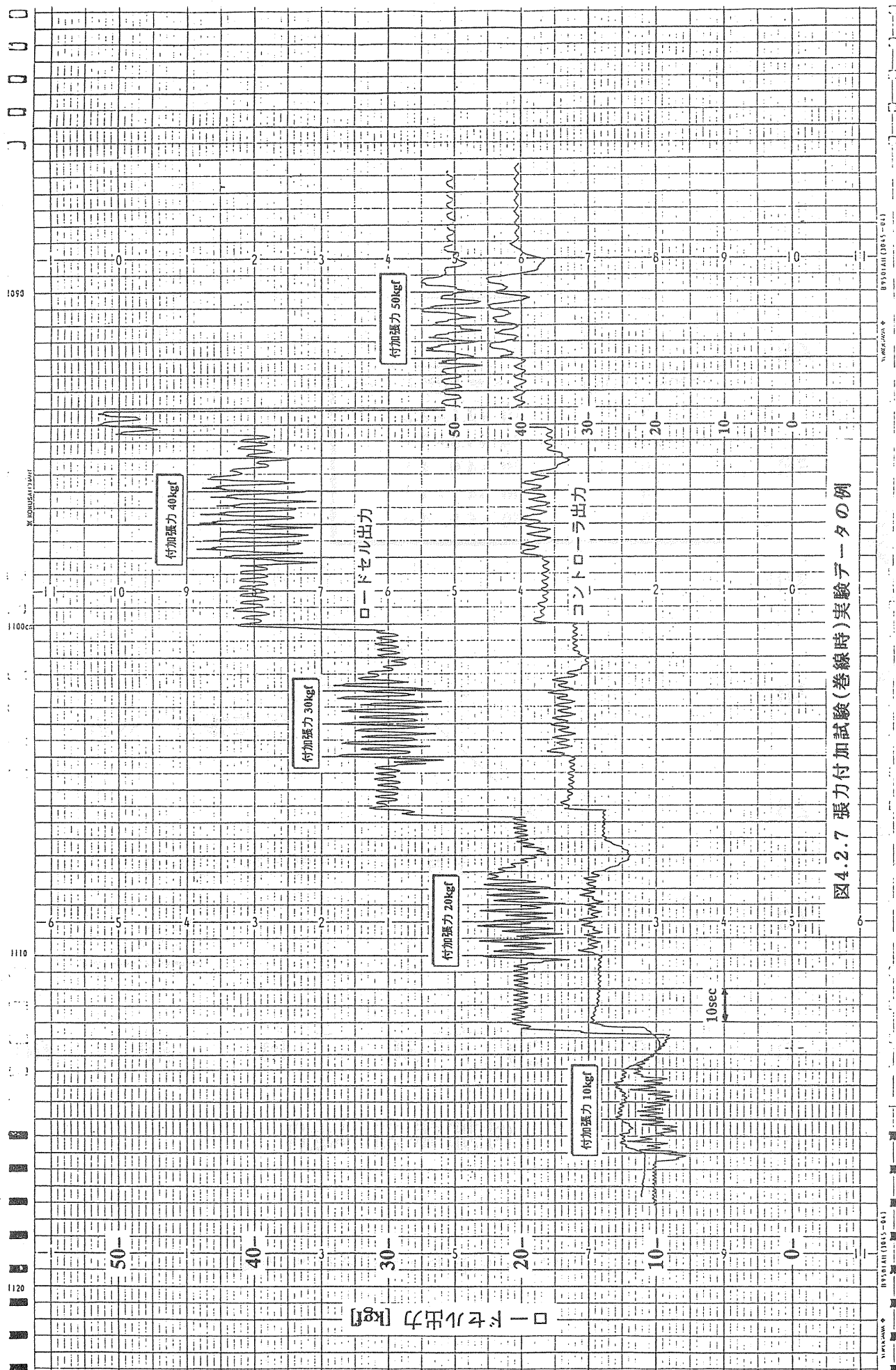


図4.2.7 張力付加試験(巻線時)実験データの例

4. 3 Nb₃Sn 永久電流スイッチの開発

4.3.1 概要

従来の NbTi 超電導線を用いた永久電流スイッチは、偶発クエンチに代表される不安定性に問題が残されていた。このため、「ヤマト 1」に搭載した永久電流スイッチは、NbTi 超電導線を用いた永久電流スイッチ素子を並列に複数個接続することによって、総合的な安定性を保つという対策を取ってきた。しかし、複数個の素子を並列に配置した永久電流スイッチでは形状・質量が大きくなり、さらに素子間の電流バランスを確保するため有限抵抗を組み込む処置が必要となり、永久電流スイッチとしての基本性能を犠牲にすることになるという欠点があった。このような問題点を解決し、単一素子で安定性を確保できる永久電流スイッチの実現を目的として、Nb₃Sn 超電導線を採用した永久電流スイッチを開発することとなった。

今回、Nb₃Sn 永久電流スイッチの安定性の検討およびオンオフ動作解析を行うと共に、Nb₃Sn 超電導線による 10,000A クラスの大電流容量永久電流スイッチを開発するための第一歩として、通電容量 1,000A クラスのスイッチ素子を製作し、各種試験を実施した。試験内容としては、静的な通電能力、オンオフ動作、および絶縁耐圧の確認に合わせて、Nb₃Sn 永久電流スイッチとしては初めて、苛酷な振動条件下における安定性評価を実施した。その結果、静的特性・動的特性共に、十分に満足できる性能を確認することができ、Nb₃Sn 永久電流スイッチが安定性に関して優れていることを実証し、大容量化への見通しを得ることができた。

4.3.2 Nb₃Sn 超電導線の採用による安定化

4.3.2.1 永久電流スイッチの不安定性

軽量コンパクト化およびオフの高抵抗化のためにマトリクス of 抵抗率が大きい超電導線を用いる永久電流スイッチでは、オンで通電電流を増加しているときに超電導線の臨界電流値よりも小さい電流でクエンチしたり、一定電流を通電しているときに偶発的にクエンチするものがある。このような不安定性の原因としては、たとえば磁界中での通電に伴う電磁力または移動体に設置する場合の振動などにより、超電導線の微小変位、含浸剤のクラック、または構成材間の摩擦が発生し、超電導線が温度上昇して常電導転移するということが考えられる。超電導線が一部分でも常電導化すると、通電電流によるジュール発熱および磁束流動による発熱が加わる。それらの発熱量が超電導線の他の部分および周囲への熱伝導による冷却熱量よりも大きければ、常電導部分が拡大して永久電流スイッチ全体

が常電導化すなわちクエンチとなる。逆に、発熱量が冷却熱量よりも小さければ、常電導転移部分は縮小し超電導に復帰する。

4.3.2.2 最小伝播領域

超電導線に加わる擾乱が局所的であれば、発生する常電導部の長さも限られたものになる。超電導線に生じた常電導部分の両境界から超電導線の長さ方向への熱伝導により冷却される熱量 W_c と抵抗領域（常電導部分および磁束流部分）で発生する熱量 W_r を比較すると、抵抗領域が十分小さいときは $W_c > W_r$ であり、抵抗領域が十分大きくなると $W_c < W_r$ になる。したがって、擾乱により発生した抵抗領域の長さがある臨界値より短ければ抵抗領域は縮小して超電導状態に回復するが、発生した抵抗領域がこの臨界値より長ければ抵抗領域は拡大して導体全体が常電導状態になる。この臨界値は、最小伝播領域⁽¹⁾と呼ばれている。

ここで、発熱は常電導部分のみで起き、熱伝導は超電導線の線方向のみと仮定する。また、常電導部分の両端での温度の傾きは超電導線の臨界温度と周囲温度の差の逆数程度と近似すれば、発熱と伝導冷却が釣り合うのは、

$$2 \lambda A \theta / l = J^2 \rho A l \quad (1)$$

ただし、 A ：超電導線の断面積

J ：通電電流密度

θ ：超電導線の臨界温度と周囲温度との差

ρ ：常電導時の抵抗率

λ ：熱伝導率

l ：常電導部の長さ

のときである。したがって、最小伝播領域の長さ l_{MPZ} は、次式で計算できる。

$$l_{MPZ} = (2 \lambda \theta / J^2 \rho)^{1/2} \quad (2)$$

4.3.2.3 超電導線の基本仕様

永久電流スイッチに使用することを想定した Nb₃Sn 超電導線の仕様を表 4.3.1 に示す。また、比較のため永久電流スイッチ用 NbTi 超電導線の仕様を表 4.3.2 に示す。

4.3.2.4 超電導線の基本物性値

最小伝播領域を式 (2) で計算するためには、Nb₃Sn 超電導線および NbTi 超電導線の臨界温度、抵抗率、熱伝導率が必要である。これらについては次のようにした。

表 4.3.1 Nb₃Sn 超電導線の仕様

臨界電流	1700A (4.2K、1T)
通電電流	1000A (4.2K、1T)
導体径	0.87mm
臨界電流密度	2800A/mm ²
通電電流密度	1682A/mm ²
マトリクス材	Cu-10wt%Ni
マトリクス比	1.2

表 4.3.2 NbTi 超電導線の仕様

臨界電流密度	2800A/mm ² (4.2K、1T)
通電電流密度	750A/mm ² (4.2K、1T)
マトリクス材	Cu-30wt%Ni
マトリクス比	1

1) 臨界温度

磁界 1T における臨界温度は一般的な H-Tc 特性から、Nb₃Sn が 17.9K、NbTi が 9.2K とする。

2) 抵抗率

超電導線はマトリックス中に Nb₃Sn や NbTi 超電導体がフィラメント状に埋め込まれているので、超電導線の常電導転移時の抵抗率はマトリックスおよび超電導体が並列接続された状態と考え、それぞれの断面の割合を考慮して、合成値として次式で求める。

$$\rho = \rho_s \rho_m (A_s + A_m) / (\rho_s A_m + \rho_m A_s) \quad (3)$$

ただし、 ρ_s : 超電導体の抵抗率

ρ_m : マトリックスの抵抗率

ρ : 超電導線の抵抗率

A_s : 超電導線断面における超電導体の断面積

A_m : 超電導線断面におけるマトリックスの断面積

Nb₃Sn 超電導線の場合は、Nb₃Sn および Cu-10wt%Ni の抵抗率がそれぞれ $1.0 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ および $1.8 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ である。したがって、式 (3) から超電導線の抵抗率は $1.32 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ となる。

NbTi 超電導線の場合は、NbTi および Cu-30wt%Ni の抵抗率がそれぞれ $5.6 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ および $3.6 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ である。したがって、式 (3) から超電導線の抵抗率は、 $4.38 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ である。

3) 熱伝導率

超電導線の線方向の熱伝導率は、マトリックスおよび超電導体のそれぞれの熱伝導率から次式で求める。

$$\lambda = (\lambda_s A_s + \lambda_m A_m) / (A_s + A_m) \quad (4)$$

ただし、 λ_s : 超電導体の熱伝導率

λ_m : マトリックスの熱伝導率

λ : 超電導線の熱伝導率

Nb₃Sn 超電導線の場合は、Nb₃Sn の熱伝導率を NbTi のそれで代用して 0.2W/mK とし、Cu-10wt%Ni の 4.2K における熱伝導率 1.4W/mK を用い式 (4) で計算すると 0.85W/mK となる。

NbTi 超電導線の場合は、NbTi および Cu-30wt%Ni の 4.2K における熱伝導率がそれぞれ 0.2W/mK および 0.7W/mK であるので、式 (4) から超電導線の熱伝導率は、0.45W/mK となる。

4.3.2.5 最小伝播領域の比較

永久電流スイッチ用の Nb₃Sn 超電導線および NbTi 超電導線のそれぞれの最小伝播領域について 4.3.2.3 節および 4.3.2.4 節の数値を用い式 (2) で計算すると、Nb₃Sn 超電導線は $7.9 \times 10^{-6} \text{ m}$ となり、NbTi 超電導線は $4.3 \times 10^{-6} \text{ m}$ となる。Nb₃Sn 超電導線の最小伝播領域は NbTi 超電導線のそれに比べ約 2 倍大きく、Nb₃Sn 超電導線を用いた永久電流スイッチは安定性が高いと考えられる。

参考文献

- (1) 超伝導・低温工学ハンドブック：低温工学協会編、オーム社
- (2) 超電導工学（改訂版）：電気学会、オーム社

4.3.3 Nb₃Sn 永久電流スイッチの動作解析

Nb₃Sn 永久電流スイッチのオンオフ動作について、有限要素法による熱伝導解析コードを用い計算機シミュレーションを行った。まず動作特性に対する断熱層の厚さ、ヒータ配置、ヒータ熱量の影響を調べるため、設計検討用モデルを設定して計算した。次に、実際

に製作した永久電流スイッチをモデル化し計算結果を実験値と比較した。

4.3.3.1 永久電流スイッチの基本構成

動作解析用の Nb₃Sn 永久電流スイッチの基本構成を表 4.3.3 に示す。超電導線巻線部は SUS の巻枠に巻かれており、その周囲を G-FRP の断熱部が覆った構造になっている。

表 4.3.3 Nb₃Sn 永久電流スイッチの基本構成

導体径	0.87 mm (絶縁外径 1.01 mm)
フィラメント径	22 μ m
フィラメント数	738
マトリックス材	Cu-10wt%Ni
マトリックス比	1.2
巻線	15 層×62 ターン
巻線長	221 m

4.3.3.2 設計検討用モデルにおけるオンオフ動作

1) 設計検討用モデル

動作特性におよぼすヒータ配置、ヒータ加熱量、断熱厚さの影響を調べるために、図 4.3.1 に示すような設計検討用の基本モデルを設定した。円筒形状スイッチの断面をモデル化しており、要素には 2 次元の軸対称要素を用いた。この要素は、円筒形状の物体の断面を模擬した要素である。

超電導材料である Nb₃Sn の物性値は NbTi のもので代用した。超電導線の物性値は、Nb₃Sn と Cu-10wt%Ni の体積割合 (1 : 1.2) を考慮して平均したものを用いた。また、超電導線巻線部については超電導線の巻数を巻線部断面積および巻線長さ (約 200m) より 1120 ターンと仮定し、そこからエポキシ、超電導線、絶縁材 (G-FRP) の体積比 (1.3 : 2.5 : 1) を求め、各物性値をその体積比で重み付けをして平均をとったものを用いた。使用した物性値を表 4.3.4 に示す。各物性値は温度依存性を考慮しており、中間温度における値は直線補間により求めた。

境界条件として、スイッチの周囲には 4.2K の液体ヘリウムによる熱伝達条件を、またスイッチの断面を上下 2 分割する対称面には断熱条件を課している。なお、熱伝達係数は温度に対する変化率を与えることで、温度依存性を考慮している。

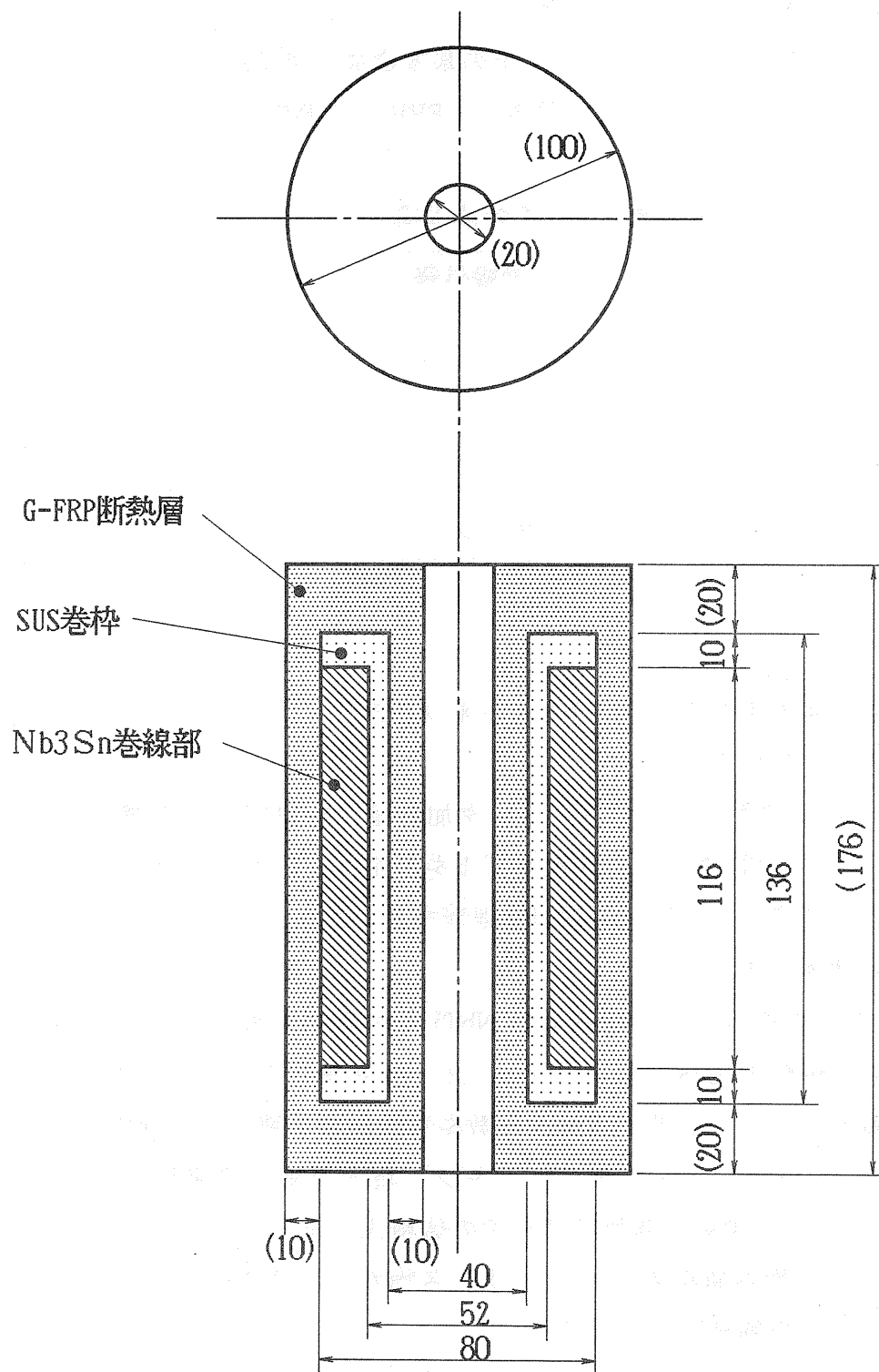


図 4.3.1 設計検討用の基本モデル

表 4.3.4 計算に用いた物性値

(a) 比熱 ($\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}$)

温度 (K)	4	6	6.7	7.1	8	10	15	20
Nb ₃ Sn(NbTi)	0.68	1.73	2.38	1.20	1.49	2.03	9.37	19.8
Cu-10wt%Ni	0.10	0.18	0.22	0.25	0.30	0.40	0.60	0.80
超電導線	0.364	0.885	1.20	0.682	0.841	1.14	4.59	9.45
エポキシ	1.05	6.00	8.00	11.0	15.0	20.0	50.0	80.0
GFRP	0.61	3.35	5.50	6.25	8.40	11.8	32.0	54.0
巻線部	0.601	2.78	4.48	4.64	6.25	8.47	22.6	37.8
SUS304L	1.50	2.50			3.50	4.00	7.00	10.0

(b) 熱伝導率 ($\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$)

温度 (K)	4	6	8	10	15	20
Nb ₃ Sn(NbTi)	0.20	0.30	0.50	0.60	0.80	1.00
Cu-10wt%Ni	1.10	2.10	3.50	5.50	10.1	10.5
超電導線	0.691	1.28	2.14	3.27	5.87	6.18
エポキシ	0.04	0.05	0.055	0.06	0.075	0.08
GFRP	0.10	0.12	0.13	0.14	0.18	0.20
巻線部	0.392	0.706	1.15	1.75	3.12	3.28
SUS304L	0.20	0.37	0.50	0.70	1.50	2.00

(c) 密度 (kg / m^3)

Nb ₃ Sn(NbTi)	6.54×10^3
Cu-10wt%Ni	8.70×10^3
超電導線	7.72×10^3
エポキシ	1.20×10^3
GFRP	1.80×10^3
巻線部	4.72×10^3
SUS304L	8.03×10^3

(d) 熱伝達係数

熱伝達係数	$2.0 \times 10^3 \text{ W/K} \cdot \text{m}^2$
熱伝達係数の 温度に対する変化率	$1.0 \times 10^4 \text{ W/K}^2 \cdot \text{m}^2$

注1) 超電導線 Nb₃Sn(NbTi) : Cu-10wt%Ni = 1 : 1.2

注2) 巻線部 エポキシ : 超電導線 : 絶縁 (GFRP) = 1.3 : 2.5 : 1

2) オンオフ動作の計算結果

以下の項目をパラメータとし、オンオフ動作の計算機シミュレーションを行った。なお、各計算条件を表 4.3.5 および図 4.3.2 に示す。

- ・ヒータ加熱量 : モデル1、2
- ・SUS巻棒 : モデル1
- ・断熱厚さ : モデル1、2、3
- ・ヒータ配置 : モデル1 (ヒータ配置は図 4.3.2 参照)

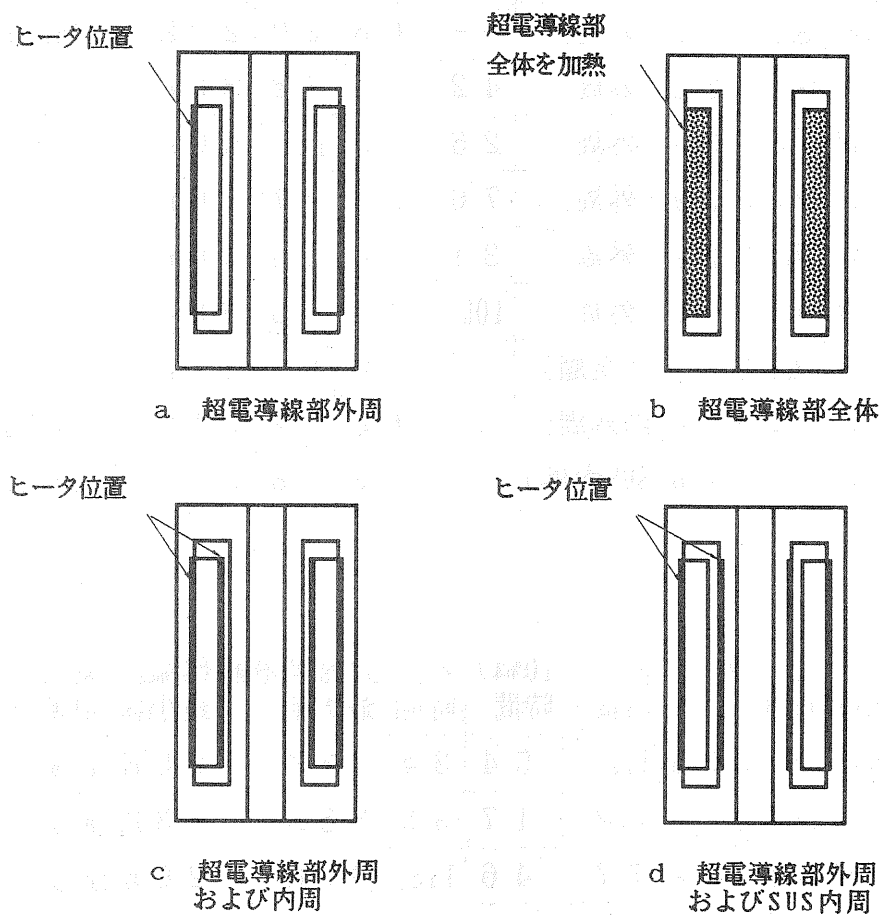
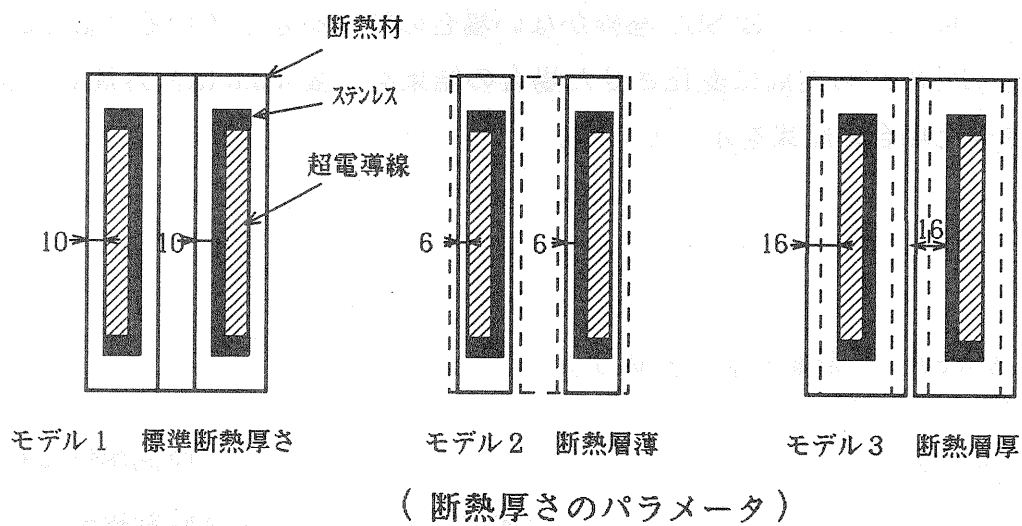
温度分布の計算結果から、温度がNb₃Snの臨界温度18K以上となった部分が常電導転移し抵抗を発生するとみなした。ここではオフ時間を、初期温度4.2Kでヒータ加熱を開始してから巻線部全体が18Kを越えるまでに要する時間とした。オン時間は、ヒータ加熱でスイッチ全体が定常状態に達した後にヒータ加熱を止め、巻線部全体が18K未満になるまでの時間とした。また、10%オフ時間とは、巻線部の10%が18Kを越えるまでの時間のことである。

ヒータ熱量は1素子あたりの熱量で表わしている。計算上は単位面積当たりの熱量(全量をヒータ面積で割った値)で与えており、ヒータが分布している場合(計算7、8、9、13、14)には単位面積当たりの熱量が等しくなるように考慮した。

表 4.3.5 計算モデルの主要寸法

(寸法単位は mm)

	モデルの特徴	断熱部の寸法 (内径側および外径側の断熱寸法)
モデル1	基本モデル	176 × 40 (10、10)
モデル2	断熱部が薄い	156 × 32 (6、6)
モデル3	断熱部が厚い	176 × 52 (16、16)



(ヒータ配置のパラメータ)

図 4.3.2 計算条件

各計算条件での動作時間を表 4.3.6、4.3.7、4.3.8 に示す。表 4.3.6 において (a) は SUS 巻棒がある場合、(b) は SUS 巻棒がない場合の結果を示している。表 4.3.7 はヒータ配置を巻線部外周から内周に変化させた場合の結果を、表 4.3.8 は内外周ヒータの加熱割合を変化させた場合の結果を示している。

表 4.3.6 計算結果 (その 1)

(a) SUS 巻棒有り

(時間単位は秒)

計算	モデル 図 4.3.2	ヒータ 加熱量	ヒータ 配置	オフ 時間	10% 時間	オン 時間	定常時巻線部温度 最大値 最小値
1	1	13W	図 4.3.2-a (外周)	—	68	20	21K 17.8K
2	1	26W	図 4.3.2-a (外周)	42	19	78	35K 28K
3	1	40W	図 4.3.2-a (外周)	26	9	121	50K 39K
4	2	26W	図 4.3.2-a (外周)	76	23	27	26K 20K
5	2	40W	図 4.3.2-a (外周)	31	10	50	36K 26K
6	3	13W	図 4.3.2-a (外周)	105	51	96	28K 24K
7	1	13W	図 4.3.2-b (全層)	—	68	21	21K 18K
8	1	13W	図 4.3.2-c (内外周)	—	68	22	21K 17.95K
9	1	13W	図 4.3.2-d (SUS 内外)	—	72	18	21K 17.9K

(b) SUS 巻棒なし

計算	モデル 図 4.3.2	ヒータ 加熱量	ヒータ 配置	オフ 時間	10% 時間	オン 時間	定常時巻線部温度 最大値 最小値	対応する 計算
10	1	13W	図 4.3.2-a	112	54	34	23K 20K	計算 1
12	1	26W	図 4.3.2-a	32	17	99	38K 33K	計算 2
12	3	13W	図 4.3.2-a	77	46	113	30K 26K	計算 6
13	1	13W	図 4.3.2-c	110	55	40	23K 20K	計算 8
14	1	13W	図 4.3.2-d	164	74	31	22K 19K	計算 9

表 4.3.7 計算結果（その 2）

（時間単位は秒）

計算	モデル 図 4.3.2	ヒータ 加熱量	ヒータ 配置	オフ 時間	10%オフ 時間	オン 時間	定常時巻線部温度 最大値 最小値
1	1	13W	図 4.3.2-a（外周）	—	68	20	21K 17.8K
15	1	13W	巻線内部（ $\phi 72\text{mm}$ ）	—	65	21	22K 18K
16	1	13W	巻線内部（ $\phi 64\text{mm}$ ）	—	62	23	22K 17.9K
17	1	13W	巻線内部（ $\phi 60\text{mm}$ ）	—	61	23	22K 17.86K
18	1	13W	図 4.3.2-c（内周）	—	57	26	22K 17.7K
19	1	13W	図 4.3.2-d（SUS 内周）	—	66	25	22K 17.4K

表 4.3.8 計算結果（その 3）

（時間単位は秒）

計算	モデル 図 4.3.2	外周側 ヒータ	内周側 ヒータ	オフ 時間	10%オフ 時間	オン 時間	定常時巻線部温度 最大値 最小値
1	1	13W	0W	—	68	20	21K 17.8K
20	1	10W	3W	—	69	22	21K 17.98K
8	1	5.13W	7.88W	—	68	22	21K 17.95K
21	1	5W	8W	—	65	22	22K 17.9k
22	1	3W	10W	—	63	26	22K 17.8K
18	1	0W	13W	—	57	26	22K 17.7K

各パラメータの影響を考察すると、次のようである

（1）ヒータ加熱量の影響（計算 1、2、3、4、5）

モデル 1（基本モデル）の場合、13W のヒータ加熱量（計算 1）では 68 秒で巻線部の 10% がオフ、定常状態では巻線部の 99% がオフとなる。定常状態から加熱を停止した場合のオン時間は 20 秒であった。ヒータ加熱量を増やした場合（計算 2）には当然オフ時間は短く、オン時間は長くなる。オンオフ動作を 60 秒以内で行うには、モデル 1 の場合で 13 ～ 26W、断熱層を薄くしたモデル 2 の場合で 40W 程度となる。

（2）断熱厚さの影響（計算 1、6 および計算 2、4）

断熱部（巻線部周りの G-FRP 部分）の厚さを増加させると断熱が良くなるために、オフ時間は短く、オン時間は長くなる。加熱量 13W のときに断熱厚さを 6mm（60%）増加させると、10% オフ時間は 0.75 倍に、オン時間は 4.8 倍に変化した。また、断熱部

を 4mm（40%）減少させると、10%オフ時間は1.2倍に、オン時間は0.35倍に変化した。

これらの計算結果より、断熱厚さに対しては10%オフ時間よりオン時間の方が敏感に変化することが解る。10%オフになる領域はヒータ付近であるため、ある程度の厚さの断熱部が存在すると、断熱厚さの増減には影響されにくいためと考えられる。

（3）SUS 巻枠の影響（計算1と10など）

基本モデルと同じ構造で、SUS 巻枠を全てG-FRPの断熱部に置き換えたモデルでは、断熱性が良くなるために同じ加熱量に対してはオフ時間は短く、オン時間は長くなる。SUS 巻枠の有無により大きく動作時間は変化しており、巻枠の影響は大きいことが解る。

（4）ヒータ配置（計算1、7、8、9）

最適なヒータ配置を模索するために、ヒータを巻線部外周に配置した場合（計算1）、巻線部全体に配置した場合（計算7）、巻線部内外周に配置した場合（計算8）、および巻線部外周とSUS巻枠内周に配置した場合（計算9）、さらにヒータ配置を巻線部外周から巻線部内周側に変更した場合（計算15、16、17、18、19）について計算し結果を比較した。ヒータ配置については図4.3.2に示してある。いずれも加熱の全量は13Wで、寸法は基本モデルと同じである。

計算1、7、8、9を比較すると、オフ時間、10%オフ時間、オン時間とも大きな変化はない。しかし、計算15～18によると、ヒータを内周側にするほど10%オフ時間は短くなっていくことが解る。計算19のSUS巻枠の内周にヒータを配置した場合は10%オフ時間が逆に長くなり、ヒータは巻線部付近に取り付けるほうが良いということが解る。

10%オフ時間を短くするためには、巻き線部の内周側にヒータを配置した方がよいが、これは外周側ヒータに比べヒータ面積が小さいために、単位面積当たりの加熱量が多くなるためと考えられる。

（5）内外周ヒータ加熱量の割合

表4.3.8より、内周側のヒータ加熱量を増やした方が10%オフ時間を短くできることが解る。したがって、10%オフ時間を問題にするならば、ヒータを内外周に配置し加熱量を分散させるよりも内周側に集中させる方がよい。

以上の計算結果をまとめると、次のようになる。

- ・基本モデルでは13W程度の加熱で10%オフおよびオンの時間が1分以内となる。
- ・断熱厚さ、SUS巻枠は動作時間に影響を与える。
- ・10%オフ時間を短くするにはヒータを巻線部内周側に配置した方がよい。

4.3.3.3 製作した永久電流スイッチのオンオフ動作

製作した永久電流スイッチについて動作時間を計算し、試験値と比較した。

1) 製作した永久電流スイッチの計算モデル

永久電流スイッチのパワーリード用の端子台がない部分の断面全体を図 4.3.3 に示すようにモデル化し、2次元の軸対称要素を用いた。

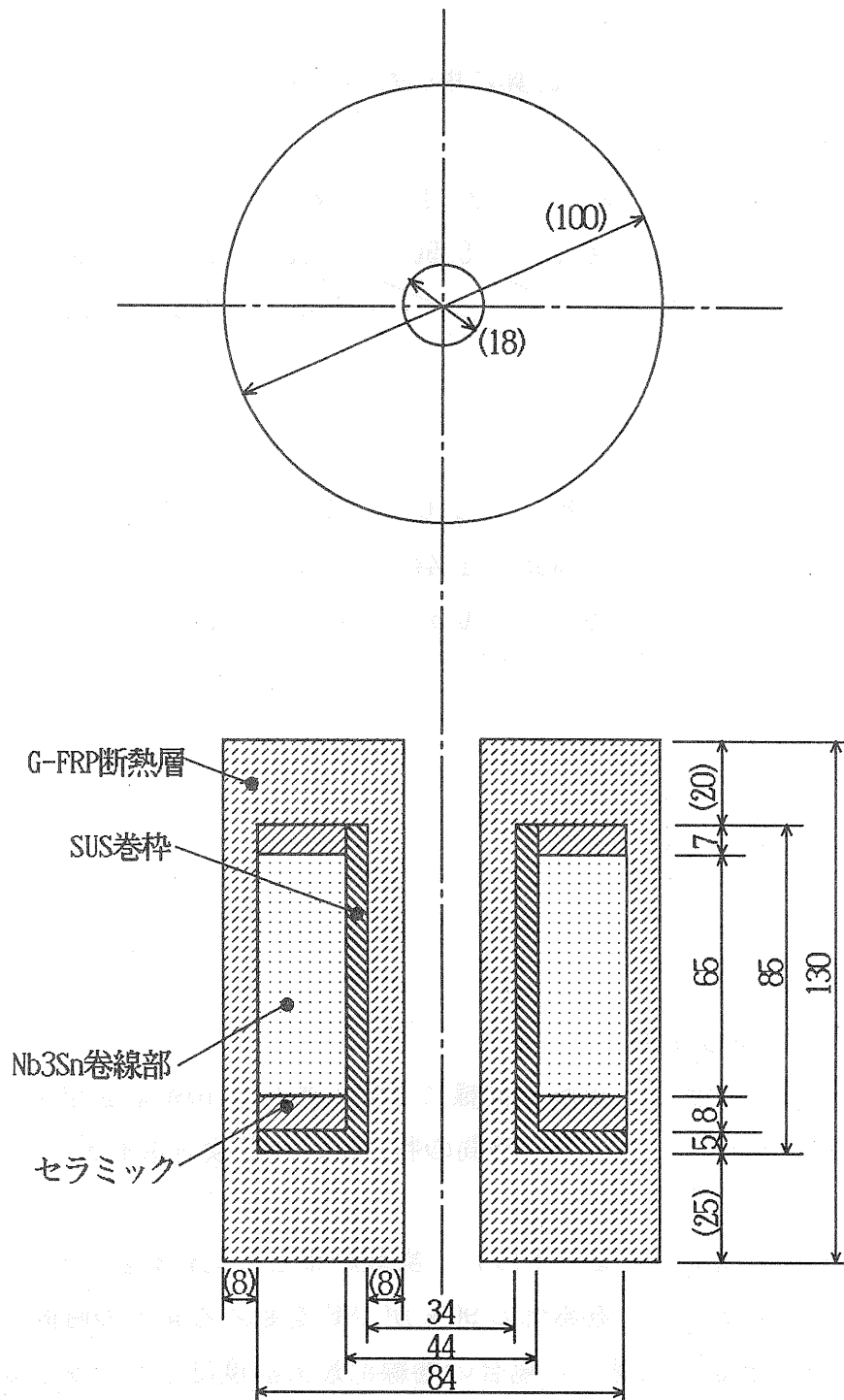


図 4.3.3 製作した永久電流スイッチの計算用モデル図

構成材料の物性値は 4.3.3.2-1) と同様である。巻線部についてはターン数および巻線部断面積を製作した永久電流スイッチの数値で求めたものを用いた。また、構成材料のうちフランジに使用しているセラミックについてはガラスの物性値を用いた。表 4.3.4 と異なる巻線部およびガラスの物性値を表 4.3.9 に示す。境界条件はモデル全周に液体ヘリウムによる熱伝達条件を課した。

表 4.3.9 計算に用いたパラメータ

(a) 比熱 ($\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}$)

温度 (K)	4	6	6.7	7.1	8	10	15	20
巻線部	0.693	3.43	4.73	5.90	7.99	10.8	28.0	46.1
ガラス	0.17	0.70			1.8	3.6	14.0	28.0

(b) 熱伝導率 ($\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$)

温度 (K)	4	6	8	10	15	20
巻線部	0.326	0.585	0.955	1.44	2.56	2.70
ガラス	0.09	0.1	0.11	0.11	0.1	0.11

(c) 密度 (kg / m^3)

巻線部	4.07×10^3
ガラス	2.40×10^3

2) オンオフ動作の計算結果

ヒータは巻線部外周に配置し、実験と同様に 1 素子当たり 10W および 20W の熱量を与え、オンオフ動作時間を計算した。動作時間の判定は、設計検討用モデルにおけるのと同様である。

オンオフ動作時間の計算結果を表 4.3.10 に、実験結果との比較を表 4.3.11 に示す。これらの表中で 90% オフ時間とは、巻線部の 90% が 18K を越えるまでの時間のことである。計算によると、定常状態まで加熱した場合の巻線部最大温度は、ヒータ加熱量 10W の場合で 22K、20W の場合で 37K になる。計算値は実験値に概ね合っているものの、オン時間および 10% オフ時間の誤差が大きいことが目立つ。実験値に比べ計算値の方が、オン

時間が短いこと、および10%オフの状態から90%オフの状態までの時間が短いことから、断熱部の熱伝導率に実際よりも大きい値を与えている可能性がある。また、10%オフ時間前後においては巻線部の温度が時間と共に急変しているために、誤差が大きくなると考えられる。

表 4.3.10 動作時間の計算結果 (時間単位は秒)

計算	モデル	ヒータ 加熱量	ヒータの 配置	10%オフ 時間	90%オフ 時間	オフ 時間	オン 時間	定常時巻線部温度 最大 最小
2 3	図4.3.3	1 0 W	巻線外側	5 7	9 0	182	2 4	2 2 K 1 9 K
2 4	図4.3.3	2 0 W	巻線外側	1 5	2 8	4 0	8 4	3 7 K 2 9 K

表 4.3.11 実験値と計算結果の比較 (時間単位は秒)

動作時間	ヒータ 1 0 W		ヒータ 2 0 W	
	実験値	計算値	実験値	計算値
オン	3 7	2 4	1 0 5	8 4
10%オフ	2 7	5 7	1 0	1 5
90%オフ	6 8	9 0	2 6	2 8
100%オフ	2 4 1	1 8 2	3 5	4 0

4.3.3.4 オンオフ動作解析のまとめ

Nb₃Sn 永久電流スイッチの試作に先だって、オンオフ動作特性を有限要素法による熱伝導計算によって求めた。得られた結果をまとめると次のようである。

- ・動作時間に対して、断熱厚さ、ヒータ熱量、SUS巻棒は大きな影響を与える。
- ・ヒータの配置によって動作時間が異なり、10%オフ時間を短くするにはヒータを巻線部内周側に配置する方が良い。
- ・実験値と計算値は概ね一致しているが、10%オフ時間では誤差が大きい。

4.3.4 Nb₃Sn 永久電流スイッチの製作

Nb₃Sn 超電導線による 10,000A クラスの大電流永久電流スイッチを開発するための第一歩として、通電容量 1,000A クラスの永久電流スイッチ素子を製作した。

4.3.4.1 永久電流スイッチ素子の仕様

Nb₃Sn 永久電流スイッチ素子の基本仕様は、下記のようなものである。

- | | |
|-----------|----------------------------------|
| (a) 通電容量 | 1000A (1T、4.2K) |
| (b) オフの抵抗 | 20 Ω |
| (c) 形状 | 円筒形 φ 100 × 130mm (図 4.3.4) |
| (d) 電流変化率 | 30A/s 以上 |
| (e) 耐電圧 | 対地：3000V 以上，線間：1000V 以上 |
| (f) 超電導線 | |
| 種別 | Nb チューブ法 Nb ₃ Sn 超電導線 |
| 導体断面径 | φ 0.87mm |
| フィラメント径 | 22 μ |
| フィラメント数 | 738 本 |
| マトリクス | Cu-10wt%Ni |
| 絶縁 | T ガラス糸編組 厚さ 0.07mm |
| 長さ | 約 221m |
| 臨界電流 | 約 1500A (at 1.5T) |
| (g) 含浸剤 | エポキシ樹脂 |
| (h) コアの材質 | SUS および G-FRP |
| (i) 冷却温度 | 4.2K |
| (j) オフ加熱量 | 10 ~ 40W |
| (k) ヒータ抵抗 | 約 40 Ω (温度 10 K) |
| (l) 重量 | 約 3 kg |
| (m) 製作個数 | 2 個 |

4.3.4.2 永久電流スイッチ素子の構造

Nb₃Sn 永久電流スイッチ素子の断面構造を図 4.3.4 に示す。また、FRP 内筒へのヒータ巻き線完了時の外観を写真 4.3.1 に、超電導線の巻き線途中の外観を写真 4.3.2 に、巻き線完了時の外観を写真 4.3.3 に、FRP 外筒を組み立てて完成した外観を写真 4.3.4 に示す。

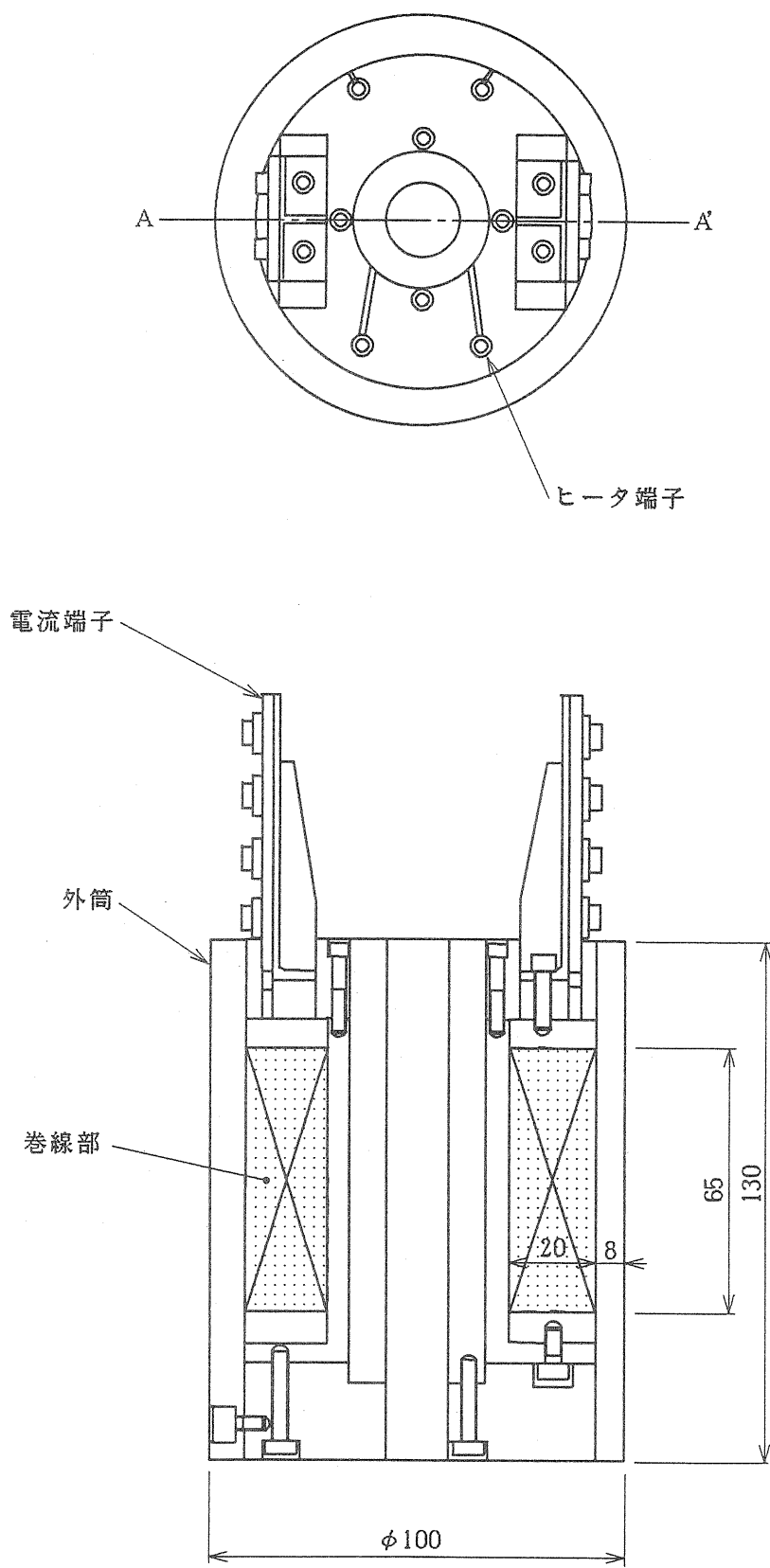
4.3.5 試験結果

4.3.5.1 試験条件および試験方法

(a) 定置通電試験

永久電流スイッチ素子への通電電流を 30A/s 以上の電流変化率で増加

試験環境：液体ヘリウムに浸漬、印加磁界 1.0T または 1.5T



断面 A - A' : 一部任意

図 4.3.4 Nb₃Sn 永久電流スイッチ素子の断面構造

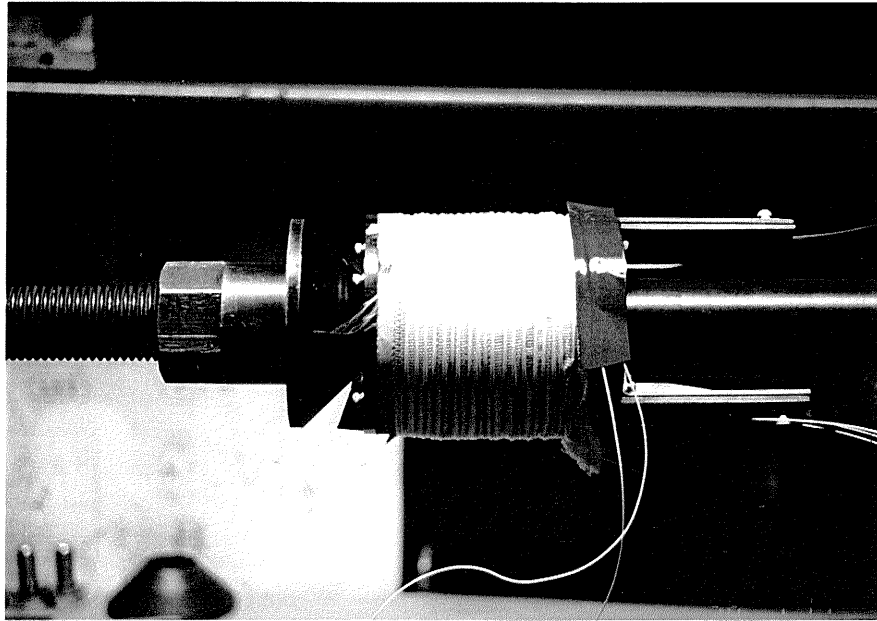


写真4.3.2 巻き線途中の外観

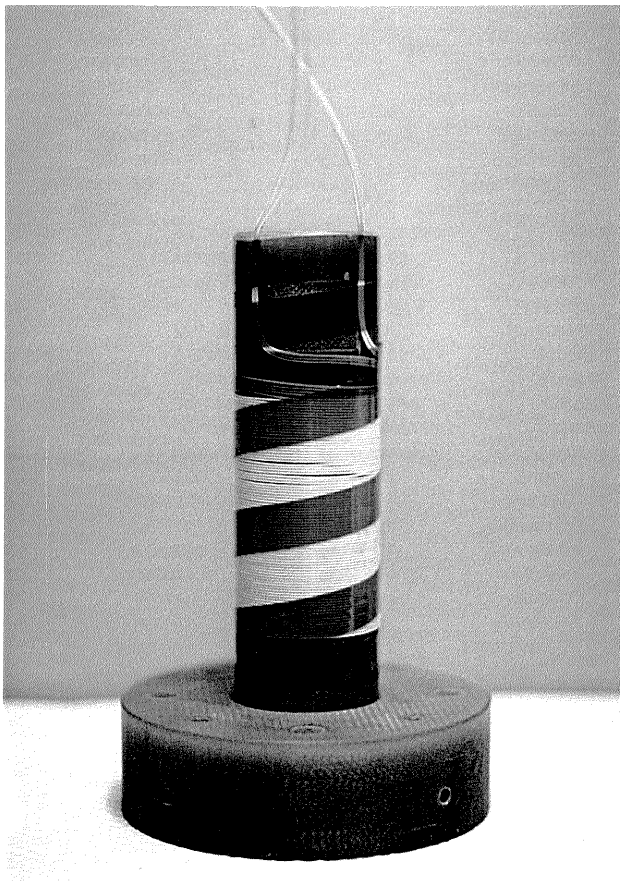


写真4.3.1 FRP内筒へのヒータ巻き線
完了時の外観

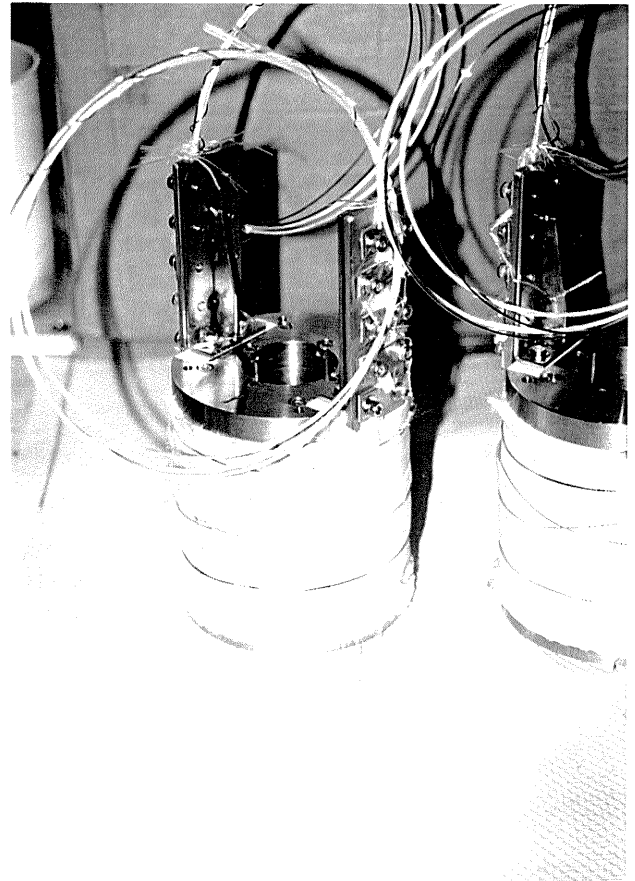


写真4.3.3 巻き線完了時の外観

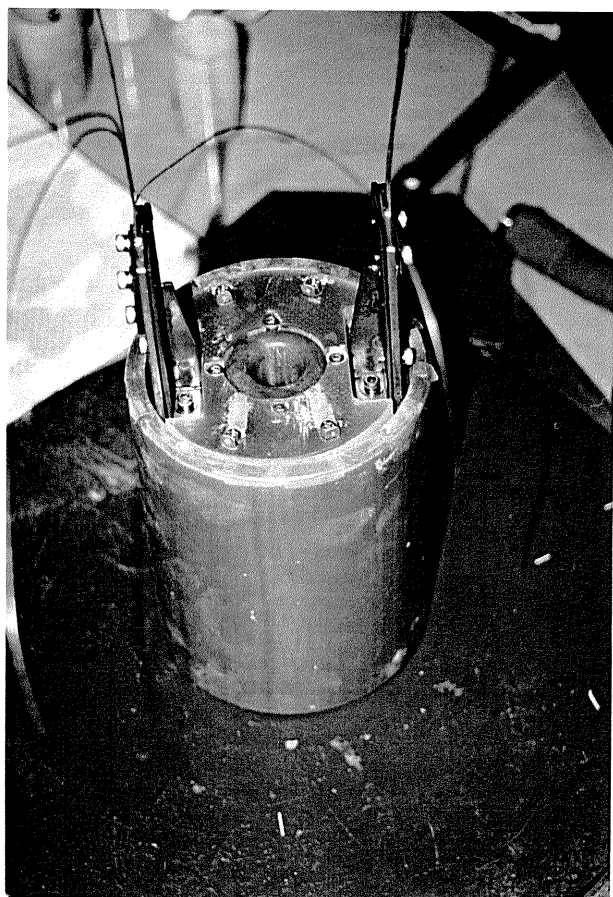


写真4.3.4 完成時の外観

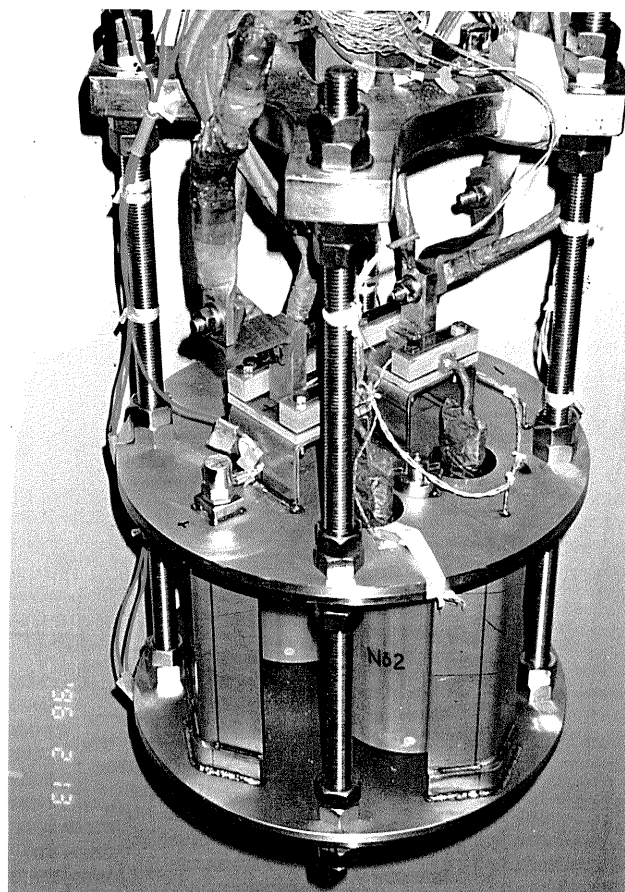


写真4.3.5 加振試験用ジグへの組立状況

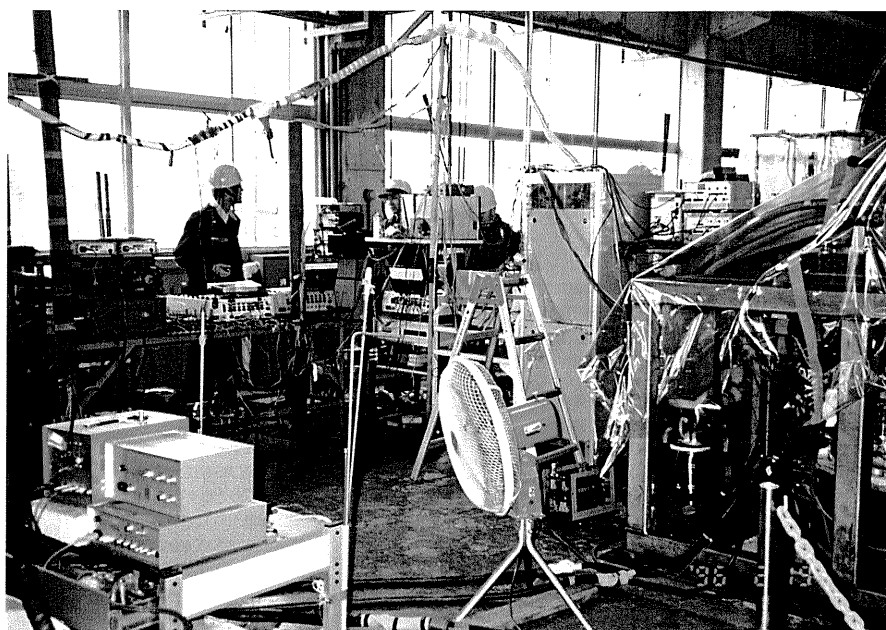


写真4.3.6 加振試験の状況

目標電流：1000A

(b) オンオフ動作試験

試験環境：液体ヘリウムに浸漬、印加磁界 1T

超電導線の電流：1mA

オフ時間：加熱開始から抵抗が $2\ \Omega$ および $18\ \Omega$ 発生するまでの時間

オン時間：加熱停止後から抵抗が $0\ \Omega$ になるまでの時間

(c) 絶縁耐圧試験

試験環境：常温のヘリウムガス雰囲気

線間（超電導リード両端間）：1,000V

対地（超電導線～ケース間）：3,000V

(d) 加振試験

永久電流スイッチに電流 1,000A を通電した状態で振動を印加

試験環境：液体ヘリウムに浸漬、印加磁界 1T（磁界の向きは振動方向に並行）

加振試験 1：全振幅 1mm、周波数 5～33Hz

加振試験 2：目標振動加速度 400m/s^2 、周波数 50～400Hz

加振装置の概略図を図 4.3.5 に示す。

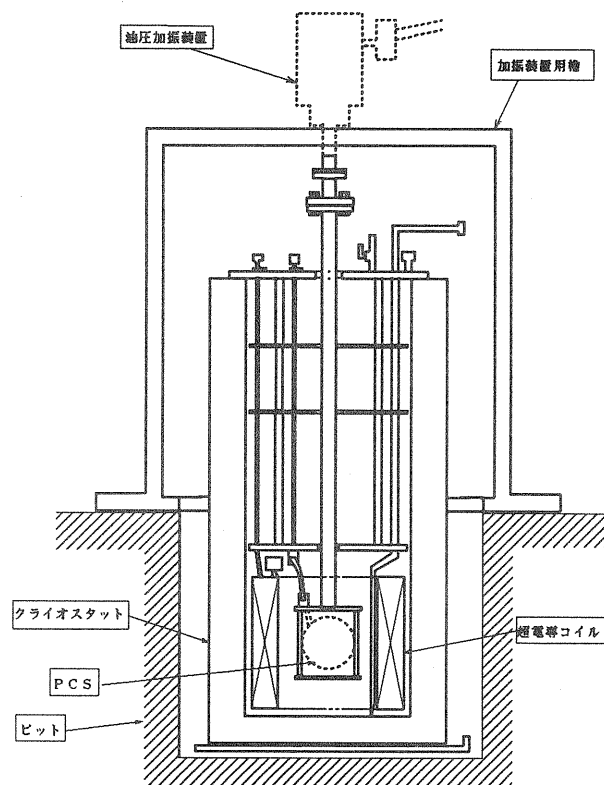


図 4.3.5 加振装置

加振装置内での永久電流スイッチ素子の設置状態を図 4.3.6 に、加振試験用ジグへの組立て状況を写真 4.3.5 に、加振試験の状況を写真 4.3.6 に示す。

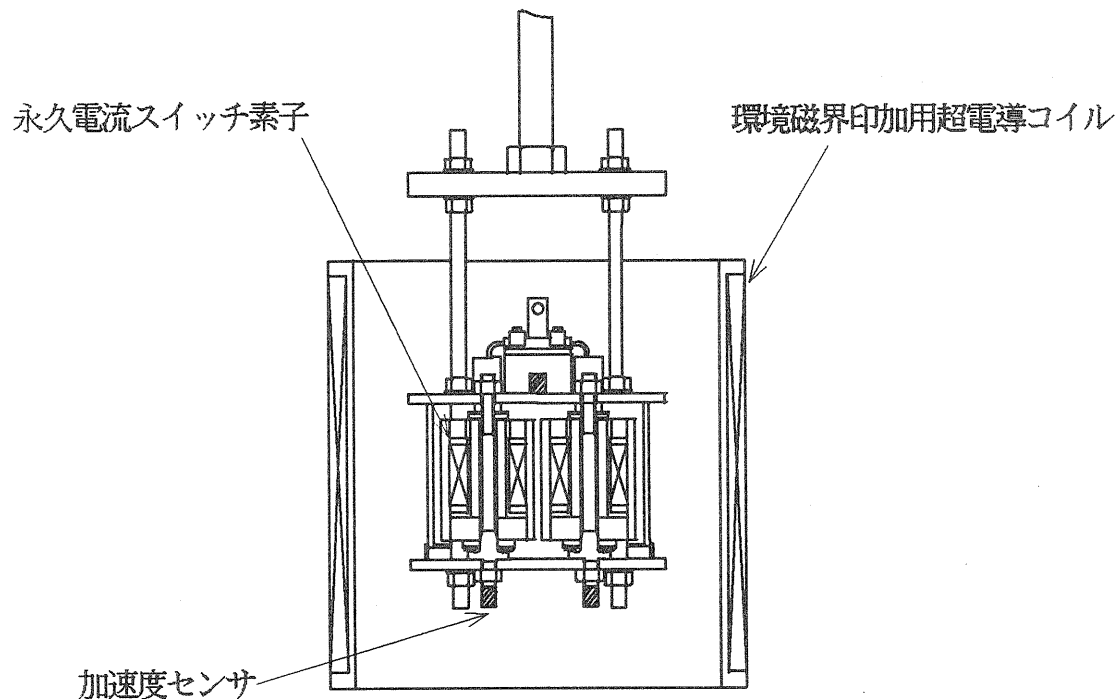


図 4.3.6 加振装置内での設置状態

4.3.5.2 試験結果

(a) 定置通電試験

磁界 1.0T において、No.1 永久電流スイッチ素子および No.2 永久電流スイッチ素子はいずれも次のような試験結果となった。

1000A at 40A/s、1.0T でクエンチせず

自己インダクタンスの測定結果 : $37\mu\text{H}$

磁界 1.5T における No.1 永久電流スイッチの通電試験の結果を表 4.3.12 に示す。電流変化率 20A/s のときは 1190A でクエンチした。電流変化率 100 ~ 33000A/s のときは電流の上限を 985A に設定し通電試験を行った結果、電流変化率 20000A/s 以下ではクエンチせず、電流変化率 33000A/s のとき 910A/s でクエンチした。

(b) オンオフ動作試験

オンオフ動作試験の結果を表 4.3.13 に示す。

表 4.3.12 No.1 永久電流スイッチ素子の通電試験（磁界 1.5T）

電流変化率	電流	通電結果
20 A/s	1190 A	クエンチ
100	985	OK
200	985	OK
500	985	OK
1000	985	OK
2000	985	OK
5000	985	OK
10000	985	OK
20000	985	OK
33000	910	クエンチ

表 4.3.13 オンオフ動作試験結果

	No. 1 永久電流スイッチ素子	No. 2 永久電流スイッチ素子
オフの抵抗	20 Ω at 10.0W	20 Ω at 10.7W
オフ時間 0 $\rightarrow$ 2 Ω	24秒 (10.0W)	
0 $\rightarrow$ 18 Ω	57秒	49秒 (10.7W)
オン時間 20 $\rightarrow$ 0 Ω	39秒 (10.0W)	39秒 (10.7W)

(c) 絶縁耐圧試験

No.1 永久電流スイッチ素子について絶縁耐圧試験を実施した結果、次のようになった。

線間（超電導リード両端間）：1,000V – 0.7 μ s 異常なし

対地（超電導線～ケース間）：3,000V – 約1分 異常なし

(d) 加振試験

加振試験の結果を表 4.3.14 ～ 4.3.17 に示す。いずれの加振試験においてもクエンチは起きなかった。

表 4.3.14 No.1 永久電流スイッチ素子の加振試験 1

電流 (A)	振動周波 数(Hz)	振動全振 幅(mm)	振動加速度 (G _{0-P})	クエンチ またはOK
1000	5	1.6	0.7 (0.7)	OK
	10	1.1	0.7 (0.7)	OK
	15	1.1	2.4 (2.3)	OK
	20	1.1	2.1 (2.1)	OK
	25	1.1	2.5 (2.5)	OK
	30	1.1	2.8 (2.8)	OK
	33	1.1	3.2 (3.2)	OK

※振動加速度の () は 500Hz のローパスフィルターを通した波形からの読取値

表 4.3.15 No.2 永久電流スイッチ素子の加振試験 1

電流 (A)	振動周波 数(Hz)	振動全振 幅(mm)	振動加速度 (G _{0-P})	クエンチ またはOK
1000	5	1.0	0 (0)	OK
	10	1.0	0.4 (0.4)	OK
	15	1.0	0.7 (0.7)	OK
	20	1.0	1.0 (1.0)	OK
	25	1.0	1.8 (1.8)	OK
	30	1.1	2.1 (2.1)	OK
	33	1.0	2.8 (2.8)	OK

※振動加速度の () は 500Hz のローパスフィルターを通した波形からの読取値

表 4.3.16 No.1 永久電流スイッチ素子の加振試験 2

電流 磁界	振動周波数 (Hz)	振動加速度 (G _{0-P})	クエンチ またはOK
1000A 1T	50	46.3 (45.6)	OK
	100	44.9 (41.8)	OK
	150	41.4 (40.0)	OK
	200	41.4 (41.4)	OK
	250	42.1 (42.1)	OK
	300	42.1 (40.7)	OK
	350	42.1 (39.3)	OK
	400	42.1 (39.3)	OK
	171	42.8 (41.8)	OK

※振動加速度の()は 500Hz のローパスフィルターを通した波形からの読取値

表 4.3.17 No.2 永久電流スイッチ素子の加振試験 2

電流 磁界	振動周波数 (Hz)	振動加速度 (G _{0-P})	クエンチ またはOK
1000A 1T	50	49.1 (48.4)	OK
	100	49.1 (45.6)	OK
	150	42.1 (42.1)	OK
	200	39.3 (37.5)	OK
	200	42.1 (40.0)	OK
	250	41.4 (39.3)	OK
	300	42.1 (39.3)	OK
	350	43.2 (40.7)	OK
	400	42.8 (37.2)	OK
	171	40.0 (38.6)	OK

※振動加速度の()は 500Hz のローパスフィルターを通した波形からの読取値

4.3.6 総合評価

Nb₃Sn 超電導線の安定性を最小伝播領域について検討した結果、従来の NbTi 超電導線に比べそれが大きく、NbTi 超電導線より Nb₃Sn 超電導線の方が安定であることが分かった。また、Nb₃Sn 永久電流スイッチのオンオフ動作について計算機シミュレーションを行い、絶縁厚さ、ヒータの容量および配置などの設計に反映した。

永久電流スイッチの安定性向上を図る目的で、Nb₃Sn 超電導線を使用した 1,000A クラスの永久電流スイッチ素子を製作し、各種試験を実施した。その結果、静的には目標の 1,000A を超える通電容量を確認することができた。また、Nb₃Sn を用いた永久電流スイッチとしては初めて実施した振動条件下における安定性評価試験では、40G を超える振動下においても、十分な安定性を確認することができた。

今年度の試作・試験によって、Nb₃Sn 超電導線を使用した永久電流スイッチの優位性を実証することができ、通電容量 10,000A を目標とした大容量化永久電流スイッチへの見通しを得ることができた。

今後、大電流容量の永久電流スイッチの設計・製作による確認と合わせて、スイッチの開閉特性を改善するための改良を行うことによって、電磁推進船のみならず、幅広い分野で使用可能な高性能永久電流スイッチを実現できるものと判断する。

5. ま と め

超電導電磁推進船「ヤマト1」の実海域における航走実験の結果、超電導電磁推進装置が船舶の推進装置として使えることが実証された。しかし、その実用化のためには、高磁界・大口径超電導磁石の開発を始めとして、励磁システムや冷凍システムなど開発すべき技術課題が数多くある。

本年度は、Nb₃Sn超電導線の巻線技術を開発するために「超電導コイル巻線機」の製作を行った。また、10,000A級大電流・高安定性永久電流スイッチの開発を目指し、その第一段階として1,000A級「Nb₃Sn永久電流スイッチ」の製作を行った。

1) 超電導コイル巻線機の製作

高磁界用超電導コイルに用いられるNb₃Sn超電導線材の巻線による性能劣化の原因を究明するために、張力等の巻線条件やコイル形状などが変えられる「超電導コイル巻線機」を製作した。これにより、張力や形状などを変えたコイルを効率良く製作することが可能になり、Nb₃Snコイルの性能劣化原因の究明が促進される。

2) Nb₃Sn永久電流スイッチの開発

永久電流スイッチの大容量化および安定性の向上を図る目的で、Nb₃Sn超電導線を使用した1,000A級永久電流スイッチの製作を行い、通電試験および加振試験を実施した。その結果、1,000Aを越える通電容量があり、また40Gの振動下においても十分な安定性があることが確認できた。

これにより、Nb₃Sn超電導線を使用した永久電流スイッチの優位性を実証することができると共に、通電容量10,000Aを目標とした大電流永久電流スイッチへの見通しを得ることができた。

A p p e n d i x 1

第14回国際磁石会議 (MT14) および第9回国際磁気測定会議 (IMMW9) 報告

会議名：第14回国際磁石会議 (MT14) および第9回国際磁気測定会議
(IMMW9: MT14に付随した会議)

開催日：1995年6月11日~16日 (MT14), 6月19日~20日 (IMMW9)

場所：Finland Tampere, France Paris

参加者：和 気 正 芳 (高エネルギー物理学研究所)

1) 第14回国際磁石会議 (MT14) について

1995年6月11日より16日までフィンランドのタンペレで開かれた第14回国際磁石会議 (MT14) には、ここ2年間の超電導磁石技術の発達を総括する会議として、各国から約500名の研究者が集まり、420編あまりの論文発表が行われた。会議における技術動向を以下に報告する。

エネルギー貯蔵：C. LUONGOがレビューを行いいくつかの論文発表があったが、プロジェクトとしては縮小の傾向が見られた。既存のエネルギー貯蔵と対抗して効率を競う場合、最初の予測よりは、計画が詳細になるほど建設コスト面でも運転経費の面でも費用がかさむ事がわかってくる。スケールメリットを生かすために、より大きなシステムへと変遷を重ねてきたが、此処に来て、都市部での電力ピークに対応する（従来の規模からすれば）超小型のシステムに目が向いて来たといえる。国家規模で巨大なエネルギー貯蔵を行う構想から民間の電力会社規模での小さな実用的な設備へと切り替わった感があるが、評価としてはさらに厳しいことになるであろう。これで生き残れば本物といえるがまだまだ前途は多難である。

浮上式鉄道：鉄道総研の沢田氏の報告が招待講演として行われ、浮上式鉄道の進歩が一望できた。ただし、他の国からの発表は行われず、アメリカで大統領の直接指揮ではじまったはずのプロジェクトは鳴りをひそめている状態であった。まだ成果として出てこないか、あるいはプロジェクト自体がうまく運営されていないかであろう。日本のこの分野での独走は各国からの賞賛となっているが、報告の多くは歴史的な経過であり、近年は山梨実験線の土木工事が努力の多くを占めており、超電導技術の進歩を直接的に見るにはまだ時期が早いようであった。今後何年かが嘱望される。

強磁場発生：強磁界発生には超電導磁石で20Tまで発生してその中に常電導の強制水冷磁石を配置するハイブリッド型が定着した。日本では東北大から金材研へ、またアメリカではMITからフロリダへと新規施設がより高い磁界で登場して強磁界のメッカが移動しつつある。ただ強磁界発生はそれを利用した研究の成果が問題なので、新しい施設がただちに研究上の成果を出しえるというわけではないところが見所になる。どちらも施設がこの1、2年で本格的に運転されはじめるので今からが勝負時となる。

生体磁場：地元フィンランドが、低温物理で名を馳せたのはヘルシンキ大学のルナスマ教授のグループによるところが大きい。マイクロケルビンに至る超低温競争で絶対の強味を誇ったヘルシンキも、今では各国でマイクロケルビンが出せるようになって、特異な存在ではなくなった。ルナスマ教授のグループは何をやっているかと思ったら、超電導SQUIDによる脳磁気の研究に取り組んでいた。脳のメカニズムを解明しようという遠大な構想であり、低温物理のパイオニアとしての力量が技術的なバックグラウンドになっているが、テーマが難しい。どこまで進めるか疑問だがあくまでパイオニア的な仕事に食い下がる精神に脱帽した。

高温超電導：ブームが去ってしばらくになるが、高温超電導の研究は今回もいろんな所で活発であった。謎解きは終わって、如何に実用に近づけるかが課題となっているがBISCO系の高温超電導体に銀の鞘をかぶせた構造は、磁石の試作に向いてきている。まだまだデモンストレーションの域を出ないとはいえ、金材研では直径20mmに2.6T、住友では直径60mmに3.5Tまで行っているのもはや磁石として無視できないレベルまで来ていると言えよう。ただし、今の所温度的にはヘリウム温度が主で、窒素温度で磁界を出すことはまだ先のことだろう。窒素温度では電流リードへの応用が盛んに議論されている。実験結果はいずれも良好で、熱侵入を大幅に減らすと結論しているが、まだ実用磁石の運転には持ち込まれていない。コストや安全性を考慮すると、原理的に実用になるものかどうかを検討する必要がある。

核融合：世界的にみれば核融合も冷え込みの厳しい分野である。各国で核融合研究が発足して久しいが、実用化へ近づいたと言う印象はもたれていない。予算の切り詰めが強く、プロジェクトの縮小があちこちにみられる。しかし、日本では核融合研の大型ヘリカルが建設たけなわであり、原研もITERに向けての準備研究を盛んにすすめている。ITERは国際プロジェクトで話はやたら大きい。日本だけが走っても、各国の歩調がそろわなければどうにもならないのはわかりきっているだけに、日本の活躍が空しく感じられた。しかしながら、ITERにからんで化合物磁石の開発は進歩を見ている。高温処理をした場合の表面処理やそれにまつわるマトリックスのよごれ等、データがちゃくちゃくと積み上げられているので、将来の発展に寄与するところはおおきいであろう。

加速器：SSCがつぶれて、アメリカでのアクティビティは落ちているが、ヨーロッパで開かれた会議なのでCERNのLHCが話題の中心となって、盛んな印象を受けた。実際、LHCは正式にプロジェクトとして承認され、日本が50億円であるが資金の齟齬を決めるなど明るい材料が多く、技術的にも着実な進展が見られた。独仏伊のメーカーが開発の初期から協力してLHCに参加しているのが強みで、研究所での開発が工場での量産に結び付きやすい形態を取っている。この段階で10Tから8.6Tに磁界を下げて、確実な建設をねらうなど、途中で建設を止めることはありえない姿勢がうかがえる。その一方で、Nb₃Snのダイポールもやはり開発を続けており、オランダのトゥエンテ大学との協力で11Tを、しかも、トレーニングなしで実現する素晴らしい成果を出した。これは大いに注目に値する。

エールステッド記念講演：磁界の単位として知られるエールステッドはフィンランドの科学者Hans Christian Oerstedにちなんだものである。かれが電磁誘導の原理を発見してことしが175周年にあたる。200年にあと1/4世紀というわけだ。それを記念して科学史的な講演がいくつかあったが、目に見えない電気概念を確立することが、いかに困難であったかがわかり大変興味深かった。エールステッドの時代には、オームの法則ですら受け入れられるのにかなりの年月がかかっているのは驚きであるが、考えてみればまったく新しい概念が目に見えないものであるときこれはむしろ当然なのかもしれない。

超電導基礎：御当地講演としてはシュリーファーの超電導の基礎の講演があったのも大変良かった。BCS理論発表のときにまだアメリカの大学院生だった彼は、学位のみならずノーベル賞までもらってスカンジナビアに帰国した。超電導では歴史的な人物であり、BCS理論の大御所とはいえ、まだ若々しく、さすがに明快な切れ味の講義であった。講義の中で「フェルミオンである電子が2個ペアになってボゾンとなりボーズアインシュタイン凝縮を起こす」という、よく解説書に出てくる話は超電導の説明としてはまったくの誤りであると、言ってくれたのは、我が意を得たりと言う思いがした。昨年、高校生に講義をしたときに気が付き、世の解説書に文句をつけていたばかりの所だったからである。

2) 第9回国際磁気測定会議 (IMMW9) について

超電導磁石の開発には磁界測定の技術が重要になるが、毎回MTが開かれる時に合わせて磁界測定のワークショップ開かれる。今回で9回目であり所管はフランス原子力委員会サックレー研究所で、磁界測定に関係する人達の間での技術交換が主な目的である。MTでは発表時間も限られており、細かいところまで議論できないのでIMMWが開かれるようになったのである。議論の時間を十分に取り、形式張らずに行われる会議で、参加人数

も50人以下の招待者に限定されている。会議でのトピックスを以下に報告する。

ホール素子：安定性の向上は100 ppmをクリアーして、素子の大きさも小さくまた3次元アレイのようなものも手にはいるようになってきている。ただし、その精度は使い方によっても変わり、いずれにせよキャリブレーションが必要であることには代わりがない。

共鳴法：NMRは製品化されたものが測定領域を広げ9 Tまでに達している。磁界解析に用いるためのマルチプローブのシステムも製品化されたが、大きいし使い方も問題が大きくまだ完成には遠い感がある。一方でフェライトを用いたFMRがCERNでトリガー用に使われて注目を浴びた。今後単純なNMRだけでなく、FMR、EPRがどの様に実用化されるか課題になるだろう。

サーチコイル：エールステッド以来のコイルを作って動かす磁界測定法はやはり、マックスウエル方程式を基本にしたオーソドックスな方法で、磁界の均一度測定には信頼性が高い。エアベアリングを使ったり、超高精度のコイル巻線など機械的な部分の改良が進み、エレクトロニクスも積分器を始めとしてかなりの進歩がうかがえた。コンピュータの性能が向上したことを反映し、高速フーリエ変換を駆使した自動解析もごく普通に使われる様になっている。

磁気共鳴：磁界測定の精度に関しては核磁気共鳴を利用する方法が、絶対測定の利点を持っており、信頼度が高い。マルチプローブにして磁界均一度の測定まで行うとか、信号の高速探索を行って精密なトリガーを発生させる等の方向がこの会議での課題であった。CERNからフェライトの電子スピンを用いた強い信号を用いる方法の報告があり、注目された。この場合、均一度の低いあるいは勾配のある磁界も測定が可能であり、今後の磁気共鳴法の応用が広がると期待される。共鳴線幅を極小化する事でシングルプローブで多重極成分を求めるアイデアを報告した。

3) 欧州研究機関における超電導磁石開発の動向調査

欧州のいくつかの高エネルギー物理学研究施設を訪問して、超電導磁石技術の最新の動向を調査したので報告をまとめる。高エネルギー物理学は伝統的に超電導磁石の応用を他分野に先駆けて進めており、超電導電磁推進船の将来技術に資するところが多い。調査した研究施設は、ドイツ電子シンクロトロン研究所(DESY、ハンブルグ)、フランス原子力委員会研究所(SACLAY、パリ)および欧州原子核研究共同機構(CERN、ジュネーブ)である。

CERN：LHCの建設が決まり、超電導磁石の開発が進行しているが、磁石の製作そのものはヨーロッパのメーカーで行われている。数社で平行して開発を進め、CERNはコーディネーションとシステムインテグレーションに力をそそいでいる。研究所で開発して企業に技術移転するアメリカのやり方との違いが鮮明であり、興味深いものがあった。磁石試験設備の責任者P. Sieversと会食することになったので、企業側の都合に振り回されずCERNのリーダーシップを保ちながら最大限企業の開発能力をひきだす戦略などをたずねてみた。いくつかのキーアイテムについてはやはりCERNのほうで研究するし、試験は全面的にCERN側で行うし、そのための設備もCERNに整備するとのことであった。すでに建物はキャンパスのフランス側に出来ており、試験用のベンチと冷凍機電源などが整備されていた。大量生産にはこの設備を並列に設置すればよく、そのためのスペースも確保してある。

SACLAY：パリの南35分の所にあるが閑静な住宅と公園の中にあるキャンパスは、研究機関としてとても良い環境にあるが原子力機関であるために、警備が厳重で外国人はパスポートの提出が必要である。超電導磁石のパイオニアであるだけに、いまではSATURNというこの加速器は時代遅れのものとなっているし、ここに新たな加速器を建設しようという計画もないが、CERNその他の開発プロジェクトを請け負うという形で先端的な研究を続けている。LHCについても、4極磁石の開発は全面的にSACLAYが請け負い、プロトタイプの試作を完了している。測定も進んでおり、1.8Kの冷凍設備もすでに稼働させて盛んにデータをとっていた。4極磁石は磁界測定が難しく、さまざまなプローブに精密加工の粋をこらしていたのが圧巻であった。

DESY：HERAは完全に定常運転の状態となり、全ての超電導磁石が順調な運転を続けていた。開発グループとしてはもはやDESYに課題がなく、CERNのLHCに協力しても良いはずなのだが、実際にはそのようなアクティビティはない。CERNに近すぎてLHC協力をやっていたのではDESYの存在意義を失ってしまうからである。

磁石の人達はDESYの次期計画であるリニアコライダーのために超電導空洞に転向しようとしていた。空洞の実験はなかなか精力的に進められ、建物も手狭に見えた。建物の方の端が薄壁になっており、計画の進展とともにこの壁をぶち抜いて建物を広げて行くつもりだ。全長10kmまで延ばしていくのである。

Appendix 2

第14回電磁流体力学国際リガ会議 (MAHYD '95) 報告

会 議 名：第14回電磁流体力学国際リガ会議 (MAHYD '95)

開 催 日：1995年8月24日～26日

場 所：Latvia Jurmala

参 加 者：元 良 誠 三 (東京大学名誉教授)

1995年8月24日から26日に亘って、ラトビアの首都リガの郊外の保養地ユルマラで開催された第14回リガ電磁流体力学国際会議 (MAHVD'95) に出席したのでその概要を報告する。

この国際会議は、ラトビアのリガにあるラトビア科学院物理学研究所の主催でほぼ隔年に行われ今回が14回目に当たるわけであるが、旧ソ連邦の電磁流体研究の中心にも当たる存在であっただけに、旧ソ連関連のこの分野の技術レベルを知るのに、よい機会であると思われた。

会議はソ連のみならず、世界中の20カ国から376名が参加し、論文集は192に達した。内容はSection A と Section Bに大別され、2つの会場で同時並行の形で行われた。以下に分野別の論文数を示す。

Section A 液体金属の電磁流体力学 (この中に海水や導電性流体、磁性流体も含まれる)

(1)理論及び一般問題	論文数 36篇
(2)数値解析	9篇
(3)金属学的応用	27篇
(4)結晶の生長	12篇
(5)対流	9篇
(6)核融合への応用	16篇
(7)アルミニウム還元電池及び二相流	10篇
(8)電磁流体発電	11篇
(9)発電機	8篇

Section B 磁性流体

(1)流体力学	16篇
(2)熱及び質量伝播	6篇
(3)物理化学特性及び物性	25篇
(4)応用	11篇
(5)その他	2篇

以上の表題から判るように、大部分が物理学的な基礎問題が多く電磁推進に関連するものとしては、

フランスのDr.J-P Thibaultの「海水中の電磁推進について」

ロシアのDr.A.I.likhochavaの「スパイラル状の管の中の電磁流」

ロシアのDr.A.Shishkoの「断面の変化する角形パイプ内の電磁流」

等であり、多少関連するもの約10篇であった。

最も関連のあるDr.Thibaultの論文はポスターセッションに廻されて口頭発表がなく、しかも本人が来て居なくて代理の人が説明していたため、詳しい事が聞けなかったのは残念であった。環状の磁界による外部磁界型推進を取扱い、流速の分布とload factor（その逆数が効率となる）の磁界内での分布を示しているのは興味深いが、結論として外部磁界型は、磁界の影響が船体の極く表面に限られるので、ダクト型に較べて高い効率が望めないとしている。

14回に亘る伝統的な国際会議であり、レベルも高いと思われるが超電導電磁推進への応用という面ではそれ程参考にはならないので、今後この会議はウォッチングの必要はないのではないかと感じた。

平成8年6月

財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団

〒105 東京都港区虎ノ門一丁目15番16号

TEL (03) - 3502 - 1828(代)
FAX (03) - 3502 - 2033